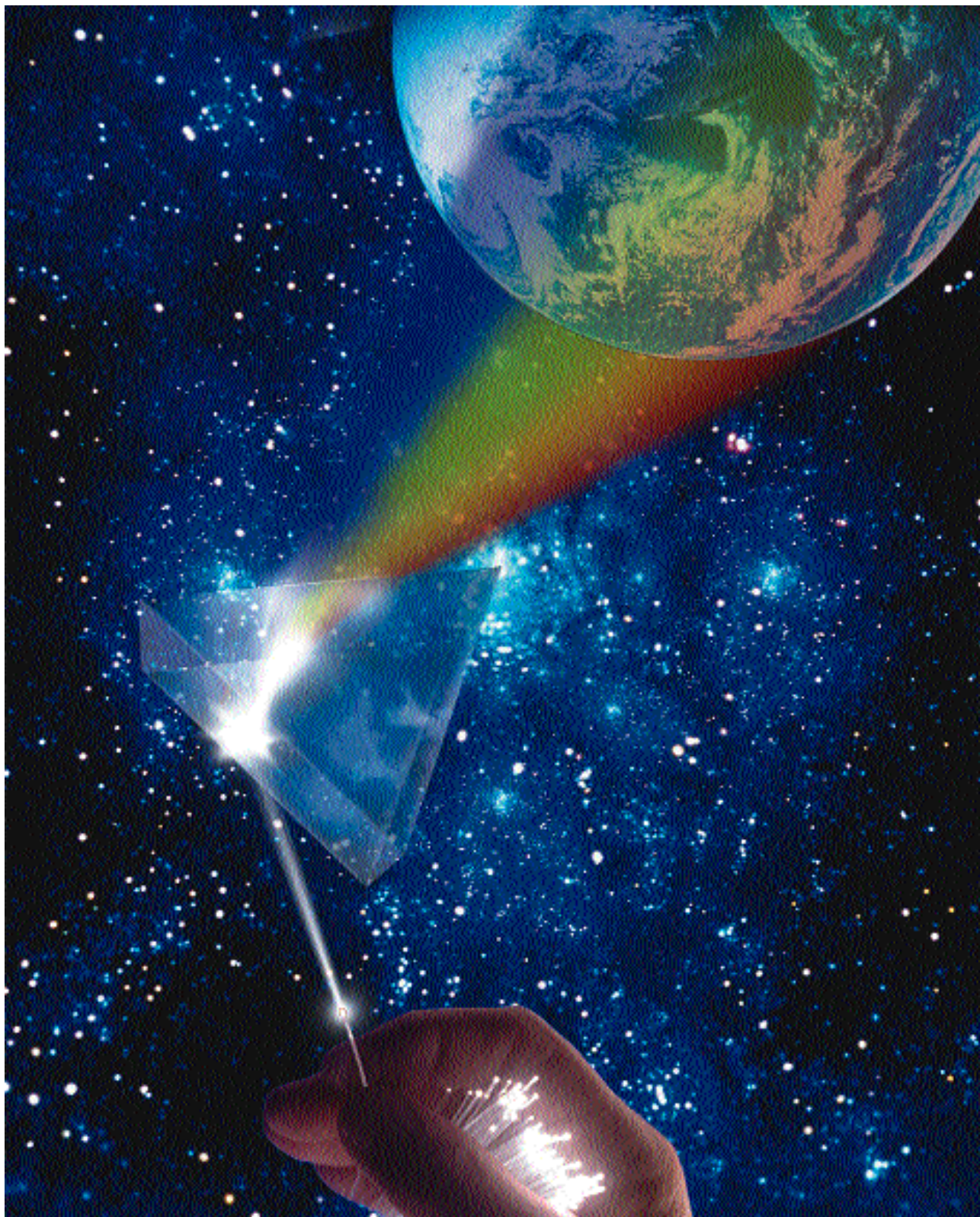


3^{er} Trimestre 1998

REVISTA DE TELECOMUNICACIONES DE ALCATEL



FOTÓNICA: ¡HÁGASE LA LUZ!

La Revista de Telecomunicaciones de Alcatel es una publicación técnica de Alcatel que presenta sus investigaciones, desarrollos y productos por todo el mundo.

REVISTA DE TELECOMUNICACIONES DE ALCATEL

3^{er} trimestre 1998

CONSEJO EDITORIAL

Peter Radley
Presidente del Consejo Editorial

Philippe Goossens
Edmond Osstyn
Editores Jefes

DIRECTORES

Marko Erman
Asesor Editorial
Director Optical Systems Department
Alcatel Corporate Research Center

Catherine Camus
Directora Jefa Adjunta y
Directora de la edición francesa, París

Mike Deason
Director de la edición inglesa, París

Andreas Ortelt
Director de la edición alemana, Stuttgart

Gustavo Arroyo
Director de la edición española, Madrid

Isabelle Liu
Directora de la edición china, Beijing

Ann Paulsrud
Asistente Editorial

Las direcciones de los directores figuran en la última página de este número.

En esta publicación no se hace ninguna mención a derechos relativos a marcas o nombres comerciales que puedan afectar a algunos de los términos o símbolos utilizados. La ausencia de dicha mención no implica, sin embargo, la falta de protección sobre esos términos o símbolos.

Revista técnica editada por Alcatel España, S.A.
Domicilio social: c/ Ramírez de Prado, 5.
28045 Madrid, España
Depósito legal: M21988/1998
ISSN: en curso
Imprime: COBRHI, S.A.
Edición española: 7.500 ejemplares
© Alcatel España, S.A.

Fotónica: ¡Hágase la Luz!

161 **Editorial**
La Fotónica se Enfrenta al Desafío del Terabit
F. BRIGGS

163 **¡Hágase la Luz!**
M. ERMAN

165 **Evolución y Tendencias del Mercado para los Sistemas de Transmisión Óptica**
R. CASTELLI, T. KRAUSE

176 **Familia de Productos Optinex**
B. CLESCA

184 **Evolución de los Sistemas Submarinos WDM hacia Redes Integradas de Terabit/s**
J. CHESNOY, O. GAUTHERON, L. LE GOURRIÉREC, V. LEMAIRE

192 **Fabricación de Láseres para Aplicaciones DWDM**
G. MESQUIDA, C. OQUEY

201 **Cables Ópticos Avanzados para Comunicaciones de Banda Ancha**
J. P. BONICEL, P. GAILLARD, G. ORCEL, B. OVERTON

210 **Impacto de la Infraestructura de Fibra en la Transmisión WDM**
A. BERTAINA, J. L. BEYLAT, S. BIGO, M. W. CHBAT

218 **Pruebas de Campo de Redes Ópticas basadas en Conversión de Longitud de Onda**
J. L. BEYLAT, M.W. CHBAT, A. JOURDAN, P. A. PERRIER

225 **Soluciones Ópticas para la Red de Acceso**
G. EILENBERGER, TH. PFEIFFER, I. VAN DE VOORDE

232 **Desde la Transmisión al Proceso: Desafío para los Nuevos Dispositivos Optoelectrónicos**
F. BRILLOUET, F. DEVAUX, M. RENAUD

Abreviaturas de este número o

Si desea recibir más información sobre cualquiera de los temas de este número, contacte con nosotros a través del Fax: 33(0)1 69 63 17 00 ó e-mail: Marko.Erman@aar.alcatel-alsthom.fr





Fred Briggs

EDITORIAL

LA FOTÓNICA SE ENFRENTA AL DESAFÍO DEL TERABIT

La construcción de la historia tiende a ser errática, sin caminos o indicios claros que guíen a aquellos que buscan previsiones para el futuro. Pero lo que suele verse como una serie de eventos aleatorios puede, en algunas ocasiones, cambiar el mundo.

¿Quién podría haber previsto que la decisión, en 1984, de un juez federal para acabar con el monopolio de la telefonía en los Estados Unidos diera lugar, justo una década más tarde, a un cambio total en la forma en que el mundo vive y trabaja actualmente? o ¿cómo un enlace de fibra óptica entre St Louis y Chicago podría ayudar a un ordenador personal a convertirse en una herramienta de telecomunicaciones tan extendida como el teléfono? o ¿que un simple protocolo de red conocido como TCP/IP pudiera finalmente permitirlo todo, desde una simple operación bancaria on-line, hasta la gestión de enormes y complejas redes, incluyendo el mayor mercado de valores del mundo y la primera central mundial de suministro eléctrico?

Está claro que una nueva era histórica está surgiendo en el ámbito de las telecomunicaciones. Desde Wall Street hasta Main Street, desde Nueva York hasta Nueva Delhi, las comunicaciones continúan cambiando no sólo la forma en que realizamos los negocios, sino también la verdadera naturaleza de los mismos. La información se dispara a la velocidad de la luz

a través de inmensas redes. Las compañías, que antaño planificaban ciclos de cinco y diez años, están encantadas con tener la certeza de dónde se encontrará el mercado dentro de 12 meses. Los protagonistas de esta industria nos encontramos en el umbral de una época que promete un crecimiento explosivo y oportunidades sin precedentes, pero sólo las compañías que asuman estos cambios estarán realmente preparadas para el futuro.

¿Qué es lo que está impulsando todo este crecimiento? No hace mucho tiempo que el Marketing reguló esta industria, impulsada por planes de abaratamiento de las llamadas o anuncios inteligentes en la televisión. Pero, incluso, todo esto ha cambiado.

Con el increíble crecimiento de Internet y la progresiva necesidad de disponer de mayores y más rápidas autopistas de información, nos encontramos en una era en donde las compañías de telecomunicaciones se jactan acerca de su multiplexación por división de onda y anuncian en los medios de comunicación el uso que realizan de la dispersión de la fibra desplazada. A través del uso de tecnologías de módem de datos por cable y líneas de abonados digitales, los consumidores tendrán muy pronto acceso de alta velocidad desde sus propios hogares, creándose incluso una mayor demanda de nuevas aplicaciones que a su vez requerirán una mayor anchura de banda.

Actualmente, alrededor de 100 millones de ordenadores personales se encuentran trabajando on-line, pero en los próximos dos años, los analistas predicen que su número se habrá duplicado, alcanzando una cifra superior a los 217 millones de equipos conectados a la red. Piense en lo que esto significa para nuestra industria.

Y observe el equipo que vamos a utilizar. Actualmente, un ordenador personal portátil trabaja, como promedio, a alrededor de 200 MIPS, y para el final de esta década esa capacidad se habrá cuadruplicado. Usted llevará en su maletín lo que se denominaba como un super-ordenador hace solamente unos pocos años.

Al mismo tiempo, no podemos olvidar que conforme se hace patente esta realidad, tan sólo el 25% de la población mundial tiene opciones de utilizar los servicios de telecomunicaciones, que la mitad del orbe no ha realizado nunca una llamada telefónica, y que aún la situación se reduce más cuando hablamos del uso que se puede realizar de Internet. ¿Cuál es el resultado final?: Un inmenso mercado sin explotar.

Como en ningún otro momento histórico, la tecnología se convierte en la llave impulsora del actual mercado de las telecomunicaciones. Y MCI tiene la intención de liderar esta revolución tecnológica, continuando nuestra evolución desde ser un suministrador de larga distancia hasta convertirnos en una compañía con expe-

riencia en el desarrollo y la utilización de las tecnologías más avanzadas a nivel mundial y con el objetivo de que nuestros clientes sean capaces de gestionar mejor, de forma más creativa y con mayor flexibilidad sus negocios.

¿Por qué MCI necesita asegurar que su red continúe siendo una de las más poderosas y avanzadas del mundo? En el nuevo milenio, ¿cómo podremos ser capaces de transportar eficientemente los trillones de bits de datos que, entre otras cosas, mantienen en el mundo a los aeroplanos volando, el mercado de valores NASDAQ operando a pleno rendimiento o Internet funcionando?

Necesitaremos que todas nuestras redes ópticas trabajen a OC-768 e, incluso con valores más altos, y también herramientas avanzadas para la supervisión, recuperación y aprovisionamiento de red.

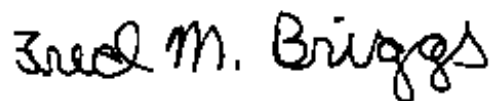
Para el comienzo del próximo siglo, requeriremos grandes transconectores ópticos con una matriz del tamaño de 256 por 256. Inmediatamente después, necesitaremos enrutamiento de terabits y dispositivos para soportar el enrutamiento de la longitud de onda, y transconectores ópticos, multiplexores ópticos y traductores de longitud de onda.

Con la convergencia de la voz y datos sobre IP, necesitaremos una plataforma de conmutación de nueva generación. En esta nueva arquitectura, la mayoría de los componentes electrónicos serán retirados de la red, y el proceso y enrutamiento de las señales serán gestionados por medio de tecnología óptica. Los conmutadores y los enrutadores serán conectados directamente a la fibra, permitiendo que las longitudes de onda sean tratadas más eficazmente, y la restauración en 50 milisegun-

dos estará disponible a través de toda la red óptica.

Y, por cierto, teniendo en cuenta de que no pensamos excavar para retirar nuestras más de 40.000 millas de cable de fibra óptica, toda esta tecnología tendrá que ser compatible con nuestros actuales sistemas a fin de proteger las inversiones ya realizadas.

Si no cometemos errores, sacaremos ventaja de nuestro potencial tecnológico, de nuestra formidable infraestructura de red y del conocimiento de nuestro marketing y ventas, para convertirnos en la compañía líder en las comunicaciones de datos, en Internet y, en general, de las tecnologías de la información del próximo milenio. Y en este camino, contaremos con la ayuda de compañías como Alcatel para el suministro de las herramientas necesarias para soportar esta enorme capacidad de futuro.



Fred M. Briggs
Chief Engineering Officer
MCI Communications Corporation

¡HÁGASE LA LUZ!

M. ERMAN

La fotónica está cambiando la manera en cómo se construyen, operan y gestionan las redes de telecomunicaciones, aportando mejores servicios a los usuarios finales.

■ Introducción

¿Es el término fotónica algo más que un ruido de campanas? Sin duda lo es, dado que la fotónica se está convirtiendo en la tecnología de moda. Un análisis estadístico reciente de los términos utilizados más frecuentemente en los títulos de los artículos técnicos publicados indicaba que, durante los últimos años, la palabra fotónica ha llegado a ser el término más generalmente utilizado, posicionándose por delante de otros como nanoestructuras, virtual o multimedia. Sin embargo, esto no es una simple cuestión de moda, sino que también refleja el impacto y el potencial de aplicación que la fotónica tiene en un conjunto de áreas diferentes, que van desde los productos de consumo hasta los equipos profesionales.

En telecomunicaciones, la fibra óptica está reconocida como un medio de transmisión superior y, consecuentemente, ha sido ya utilizada desde hace años. Sin embargo, durante los últimos dos años, el interés por las tecnologías ópticas ha explotado y nuevas compañías –inmensamente rentables– están floreciendo. No existe una sola conferencia sobre comunicaciones ópticas que no atraiga a un gran número de participantes (por ejemplo, a la última conferencia e exhibición sobre Optical Fiber Communication en San José asistieron casi 10.000 personas), y el mercado está experimentando un rápido crecimiento. Por tanto, ¿cuáles son las claves que explican este interés?

Técnicamente hablando, la razón es la introducción de la Multiplexación por División de la Longitud de Onda (WDM) capaz de explotar la dimensión de la longi-

tud de onda. Esta evolución tecnológica es el resultado de varios factores:

- Una aceleración en la tasa de incremento de la capacidad de transmisión, fuertemente influenciada por el rápido crecimiento de las comunicaciones de datos, y de Internet en particular.
- La necesidad de alcanzar el mayor uso posible de las redes existentes de fibra óptica.
- El cambio en las exigencias de competitividad como consecuencia de las nuevas regulaciones.

El uso de la multiplexación de la longitud de onda (por ejemplo, 4 x 2,5 Gbit/s), además de la multiplexación por división en el tiempo (por ejemplo, 10 Gbit/s), han demostrado que es la solución más económica en muchos casos. Hoy en día, gracias al uso de la WDM, los equipos comerciales pueden alcanzar una capacidad de transmisión de más de 100 Gbit/s en una simple fibra. ¡Los laboratorios de investigación están trabajando en sistemas de Terabit/segundo! Sin embargo, la alta capacidad de la transmisión WDM es sólo el comienzo de una nueva etapa histórica. Las más atractivas aplicaciones de la fotónica en las telecomunicaciones están justo empezando a aparecer y están estrechamente ligadas al concepto de conectividad óptica.

Este número de la Revista de Telecomunicaciones de Alcatel revisa las actividades de Alcatel en el campo de las redes ópticas y tecnologías relacionadas. Abarca tanto artículos orientados al producto, como otros que describen las actividades de investigación de Alcatel en este campo. El primer artículo, “Evolución y Ten-

dencias del Mercado para los Sistemas de Transmisión Óptica”, presenta sistemas de transmisión ópticos y ayudará al lector a entender los factores de mercado que favorecen la introducción de los sistemas WDM. Los productos de Alcatel para los sistemas de transmisión terrestre WDM se presentan en el siguiente artículo sobre “Familia de Productos Optinex”. Los sistemas submarinos se encuentran a la cabeza de muchas tecnologías de transmisión. Un caso similar a lo que sucede con los sistemas soportados en WDM, tal y como se ilustra en el artículo “Evolución de los Sistemas Submarinos WDM hacia las Redes Integradas de Terabit/s”.

La conectividad WDM no sería posible sin la disponibilidad de componentes dedicados, en particular los componentes optoelectrónicos. Alcatel fue una de las primeras compañías en liderar la fabricación de los láseres WDM, como se describe en “Fabricación de Láseres para Aplicaciones WDM”. Además de las aplicaciones en el centro de la red, la óptica está siendo utilizada, desde hace algún tiempo, en el área de acceso para las aplicaciones de Red de Área Metropolitana (MAN) y de Televisión por Cable (CATV). El artículo sobre “Cables Ópticos Avanzados para la Comunicación de Banda Ancha” describe las distintas tecnologías de cable utilizadas en los productos de Alcatel.

El artículo “Impacto de la Infraestructura de Fibra en la Transmisión WDM” es el primero de varios trabajos que analiza los diferentes casos que están siendo actualmente investigados en el Centro Corporativo de Investigaciones de Alcatel. En él se analiza, para los distintos tipos de fibra actualmente disponibles, qué canti-

dad de capacidades (por ejemplo, 32 x 10 Gbit/s) pueden transmitirse sobre cientos de kilómetros. Especialmente, resalta la importancia de la compensación por dispersión cromática utilizada en dichos sistemas. El siguiente artículo de investigación sobre "Pruebas de Campo de Redes Ópticas basadas en la Conversión de Longitud de Onda" describe el concepto y el papel de los transconectores en la traducción de la longitud de onda totalmente óptica y una demostración de las funciones de enrutamiento óptico. El prototipo, que se construyó formando parte de un proyecto de colaboración europea (ACTS OPEN), es el primero que se ha construido en el mundo. Las experiencias de campo se han llevado a cabo en las redes de Noruega-Dinamarca y Francia-Bélgica.

La fotónica también ofrece potentes soluciones en la red de acceso para proporcionar, finalmente, el más alto ancho de banda a las instalaciones de los abonados, como se argumenta en "Soluciones Ópticas para la Red de Acceso". La investigación sobre componentes electrónicos avanzados está validando conceptos de sistemas avanzados y abriendo nuevos caminos que incluyen un incremento de la tasa de bit por un sólo canal de hasta 40 Gbit/s, así como también el desarrollo de funciones totalmente ópticas, tales como la traducción y regeneración de la longitud de onda. Las actividades de investigación de Alcatel en este campo se resaltan en el último artículo de esta revista "Desde la Transmisión al Proceso: Desafío para los Nuevos Dispositivos Optoelectrónicos".

Hoy en día, la revolución fotónica está cambiando la forma en cómo se construyen, operan y gestionan las redes de telecomunicaciones. Las nuevas tecnologías y un entorno de cambio permanente están creando la necesidad de una rápida adaptación, así como nuevas oportunidades para los operadores de telecomunicaciones y fabricantes de equipos. Ello nos llevará a proporcionar mejores servicios para los usuarios finales. Como se muestra en este número de la Revista de Telecomunicaciones de Alcatel, Alcatel está participando activamente en esta era de las tecnologías fotónicas desarrollando nuevas soluciones de sistemas. Como resultado, Alcatel se ha convertido en un líder en las tecnologías ópticas. ¡El futuro de la luz es brillante!



Marko Erman

Director Optical Systems Department
Alcatel Corporate Research Center

EVOLUCIÓN Y TENDENCIAS DEL MERCADO PARA LOS SISTEMAS DE TRANSMISIÓN ÓPTICA

R. CASTELLI
T. KRAUSE

El enorme crecimiento actual del tráfico de datos se satisfará con la introducción de redes totalmente ópticas y una nueva capa óptica de red

■ Introducción

La Ley de Moore establece que la potencia de procesamiento se duplica cada dieciocho meses. No obstante, el crecimiento del tráfico de datos en la red pública está sobrepasando esta velocidad, doblándose aproximadamente cada doce meses (**Figura 1**). Las razones de este crecimiento son, como siempre, coste y capacidad. En muchos aspectos, la demanda está creciendo porque existen capacidades y menores costes que nunca.

Gracias a nuevas tecnologías, como amplificadores ópticos y multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM), el coste de la infraestructura de red resulta ahora enormemente más económico que en el pasado. Por ejemplo, los amplificadores ópticos en línea han reemplazado en gran medida a los regeneradores de red óptica síncrona (SONET) y jerarquía digital síncrona (SDH) en las redes de infraestructura de alta velocidad. Al utilizarse la conjunción con DWDM, el coste de la regeneración con amplificadores ópticos se reduce hasta 40 veces, en comparación con los sistemas SONET/SDH. Esto, por descontado, capacita a los proveedores de servicios para ofrecer servicios de gran ancho de banda, tales como acceso a Internet a alta velocidad y videoconferencia, a un mercado mucho más extenso, lo que a su vez impulsa a la red hacia mayores capacidades. Son simples principios económicos de suministro y demanda, como resultado del menor coste de los pa-

quetes de datos, los que se sitúan en el corazón de este crecimiento.

Hace diez años, las velocidades disponibles para desarrollar redes de infraestructura ópticas se situaban entre 565 Mbit/s y 1,2 Gbit/s. Las topologías de anillo aún existentes se utilizaban en raras ocasiones, y la distancia máxima entre dos puntos sin regeneración era de 60 a 80 kilómetros. Unas pocas redes de acceso local operaban a velocidades superiores a 150 Mbit/s y un usuario final raramente necesitaba más de unos cuantos circuitos de voz y una red de área amplia (WAN), operando

como máximo a 10 Mbit/s. Y lo que es más importante, Internet era un proyecto gubernamental en cooperación con algunas universidades, y la mayoría de nosotros aún estábamos peleándonos con módems de 300 baudios para cargar juegos electrónicos de mesa desde lugares públicos.

Al mismo tiempo, la tecnología se ha estado moviendo a un confortable ritmo de duplicación de la capacidad de transmisión cada tres o cinco años, a través de avances en la multiplexación por división en el tiempo (TDM). Antes, el tráfico de datos constituía un pequeño

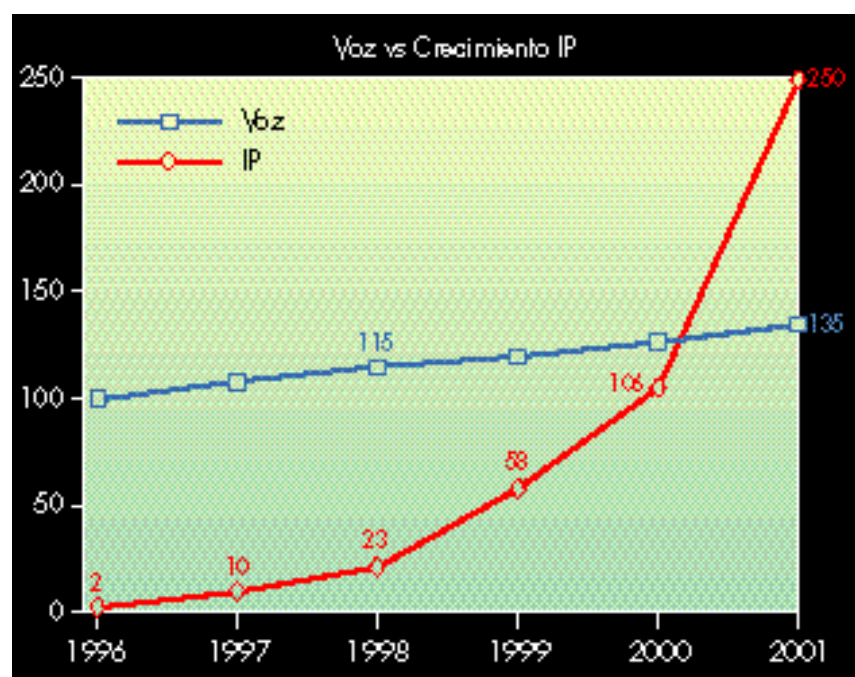


Figura 1 - Crecimiento del tráfico de datos en Norteamérica.

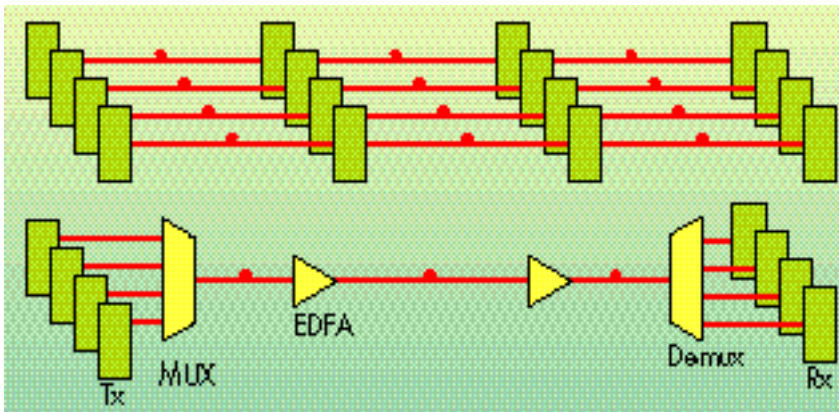


Figura 2 - Despliegue inicial de amplificadores ópticos y DWDM para aplicaciones de larga distancia.

porcentaje de la totalidad de la red y su contribución al crecimiento total era mínimo. De cualquier forma, con la mayoría de estudios prediciendo que el tráfico de datos podría exceder al tráfico de voz en el año 2001 (**Figura 1**), se hizo necesario acelerar el desarrollo de nuevas tecnologías de banda ancha. DWDM ha proporcionado la solución.

Los amplificadores ópticos, que han sido usados durante algún tiempo en aplicaciones de redes submarinas, comenzaron a aparecer en aplicaciones terrestres en los Estados Unidos en 1990 ó 1991 como amplificadores elevadores de potencia. Fueron colocados al final de la fuente de un enlace de transmisión para elevar la potencia óptica de un terminal SONET/SDH, normalmente operando a 2,5 Gbit/s. Los amplificadores ópticos fueron utilizados primeramente donde barreras geográficas como lagos, zonas pantanosas, mares o montañas, impedían el despliegue de un enlace de regeneración. Con este enfoque era posible salvar tramos de hasta 200 kilómetros. En 1994/95, los amplificadores en línea (ILAs) comenzaron a sustituir los regeneradores SONET sobre enlaces de canal simple, la mayor parte a la velocidad de 2,5 Gbit/s (**Figura 2**). Los ILAs eran menos complicados y, por tanto, menos caros que los regeneradores, pero sólo amplificaban la potencia óptica. En combinación con mejoras en la tecnología láser, pilotadas por Alcatel Optronics, fue posible conseguir tramos sin regeneración de hasta 600 kilómetros. En 1996/97, comenzó el

despliegue de sistemas DWDM de 16 canales, aumentando los beneficios económicos de los amplificadores ópticos y aliviando el creciente problema de la congestión de fibra.

El primer operador en adoptar DWDM para despliegues masivos fue Sprint Long Distance, en los Estados Unidos. Muchas de las rutas de fibra de Sprint fueron instaladas a principios de los ochenta cuando los cables contenían por lo general doce fibras y, desde luego, no más de veinticuatro. La decisión de Sprint, en 1993, de desplegar sólo tecnología de anillo bidireccional de cuatro fibras aceleró el uso de su planta de fibra hasta el punto de que más del 80 por ciento de su fibra instalada se encontraba en uso. Al quedar anticuada por su madurez la tecnología TDM de 10 Gbit/s, la tecnología DWDM apareció justo a tiempo para ayudar a resolver los problemas de agotamiento de ancho de banda de la fibra de Sprint. Desde entonces, Sprint ha desplegado más de 300 millones de dólares en sistemas DWDM. Se espera que el total de implantaciones de sistemas DWDM y otros productos de capa óptica en los Estados Unidos alcance, al menos, de dos a tres mil millones de dólares para el año 2001.

La primera fase de la introducción de DWDM se ha caracterizado por lo siguiente:

- en su mayoría de ocho canales, con demandas para futuras fases de dieciséis;

- multiplexación de 16 tributarios STM, con unas pocas excepciones para dar soporte a sistemas plesiócronicos existentes;
- distancias de unos pocos centenares de kilómetros entre terminales;
- descenso de unas pocas longitudes de onda en las estaciones secundarias; integración TDM/DWDM donde resulta posible.

La integración de TDM y DWDM ha hecho posible proporcionar el ancho de banda requerido y lograr, al mismo tiempo, la calidad de servicio (representación de errores, disponibilidad, supervivencia) y las características de gestión de la red ofrecidas por SONET/SDH y la Red de Gestión de Telecomunicaciones (TMN).

Donde es aplicable, los terminales SONET/SDH han sido equipados con puertos agregados (lado de la línea) apropiados para interactuar con sistemas DWDM (es decir, proporcionando las señales transmitidas con fuertes tolerancias, características de estabilidad de longitud de onda y tonos piloto de canal, y regenerando las señales recibidas corrompidas por el ruido de amplificador acumulado). Probando estas ópticas, llamadas "coloreadas", directamente en los elementos de la red TDM se elimina la necesidad de transpondedores en los sistemas DWDM, que implican duplicación de ópticas y por tanto mayor coste y menor fiabilidad.

Siguiendo una serie de pruebas tecnológicas, llevadas a cabo por los mayores operadores de telecomunicaciones en cooperación con fabricantes y universidades técnicas bajo el patrocinio de la Unión Europea, el despliegue de la DWDM comenzó en Europa y el mercado mundial con la adopción del estándar europeo (definido por ETSI, Instituto de Normalización de Telecomunicaciones Europeo) en 1997, dos años después que en América del Norte.

La gran fuerza impulsora, tras la introducción de la DWDM en Europa y su área de influencia, ha sido el alto crecimiento del tráfico intercontinental, principalmente estimulado por la demanda de acceso a Internet. Desde los segmentos submarinos de las nuevas redes intercontinentales, donde la

DWDM ya había sido ampliamente desplegada, la tecnología fluyó de manera natural a los segmentos terrestres y las redes de retorno, tan pronto como se hizo competitiva en coste en comparación con la multiplexación por división de espacio y división de tiempo. Dos grandes proyectos -Gemini y SEA-ME-WE 3- son ejemplos de estas tempranas aplicaciones [1].

Propiedad de WorldCom y Cable and Wireless, Gemini consta de un anillo submarino trasatlántico y dos anillos terrestres en los Estados Unidos y el Reino Unido, proporcionando un enlace de 20Gbit/s entre Nueva York y Londres (Figura 3). En los retornos terrestres se utilizan ocho canales DWDM que ofrecen una capacidad de 8x2,5 Gbit/s. La red es, de forma lógica, equivalente a anillos triples SDH superpuestos e interconectados a través de nodos duales con caída y protección continua para conseguir alta disponibilidad de tráfico.

SEA-ME-WE 3, que es propiedad de 34 operadores, conecta cuarenta estaciones desde Australia y Japón hasta el Norte de Europa, a través de Oriente Medio; transporta ocho longitudes de onda sobre cada par de dos fibras en un cable submarino. La sección desde el Mar Rojo al Mediterráneo consta de un

segmento terrestre que cruza Egipto. Suez, El Cairo y Alejandría se encuentran conectados por dos sistemas DWDM desplegados a lo largo de una ruta sur y una ruta norte con protección 1+1, proporcionada por los terminales SDH STM-16 (Figura 4).

Los nuevos operadores, que están entrando en el mercado europeo para aprovechar las ventajas de la liberalización, han visto en la DWDM una potente y competitiva tecnología que pueden explotar. Tanto los nuevos proveedores de acceso como los operadores de operadores (por ejemplo, los operadores que tienen a otros operadores como clientes) han comenzado a construir redes de gran capacidad por medio de multiplexación de longitud de onda sobre un mínimo número de fibras, que en su mayor parte alquilan.

En tales casos, los principales objetivos son una alta capacidad de ancho de banda por cada par de fibra y un rápido despliegue. Flexibilidad y protección todavía se confían a la arquitectura de red SDH y sus elementos.

Londres, París, Bruselas, Amsterdam, Dusseldorf y Frankfurt se cuentan entre las principales ciudades conectadas por medio de estas redes paneuropeas. Como en el caso de WorldCom, la red conti-

ental se enlaza con el Reino Unido vía cables submarinos sin repetidor y, desde allí, a través de la red de retorno del Reino Unido y cables transatlánticos, con los Estados Unidos. De esta forma, la red puede dar soporte tanto a comunicaciones intraeuropeas como a tráfico intercontinental.

En paralelo a la construcción de nuevas redes por parte de operadores con alcance continental o transcontinental, o sólo nacional (el caso de segundos operadores en un país determinado), DWDM está siendo adoptada por los operadores establecidos. El primer problema que desean resolver es la congestión de la fibra en partes específicas de sus redes. El segundo problema es más estratégico e implica la creación de infraestructuras paneuropeas para soportar sus actividades internacionales. British Telecom y KPN, de Holanda, han sido particularmente activos en ambas áreas. Telefónica de España y Telenor de Noruega también han lanzado proyectos DWDM para desarrollar la capacidad de algunas de las mayores rutas de sus redes domésticas.

Desarrollar segmentos de redes existentes requiere que el sistema DWDM proporcione soporte para terminales ópticos existentes con distintas

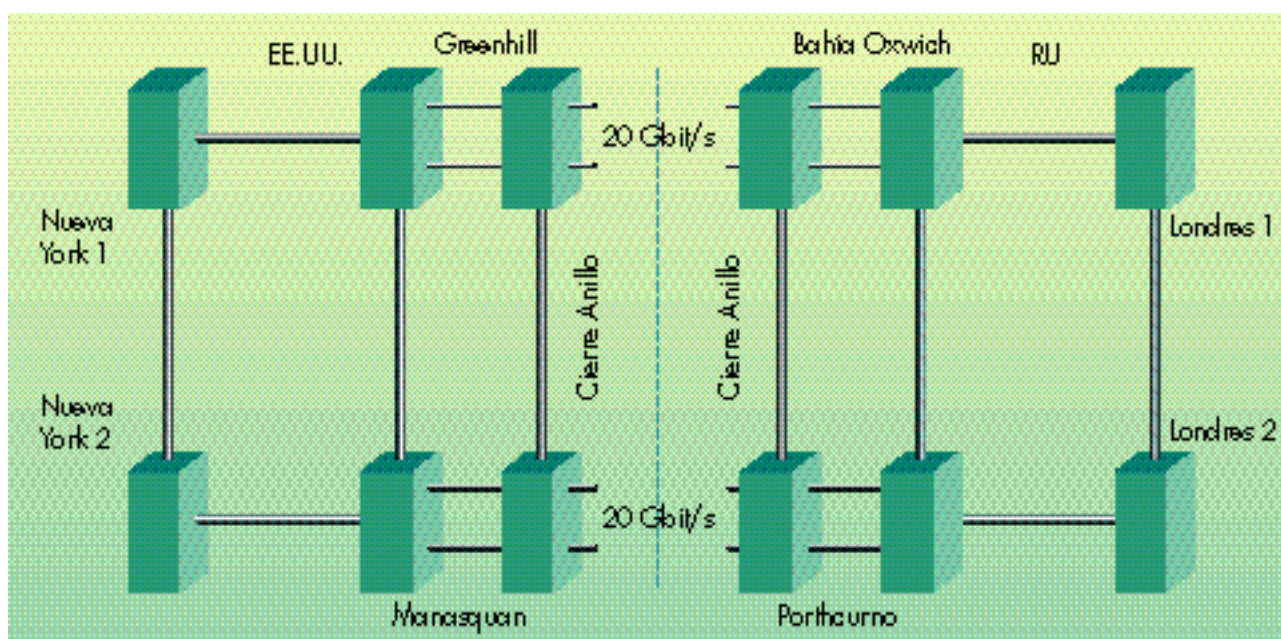


Figura 3 - Arquitectura de red Gemini.

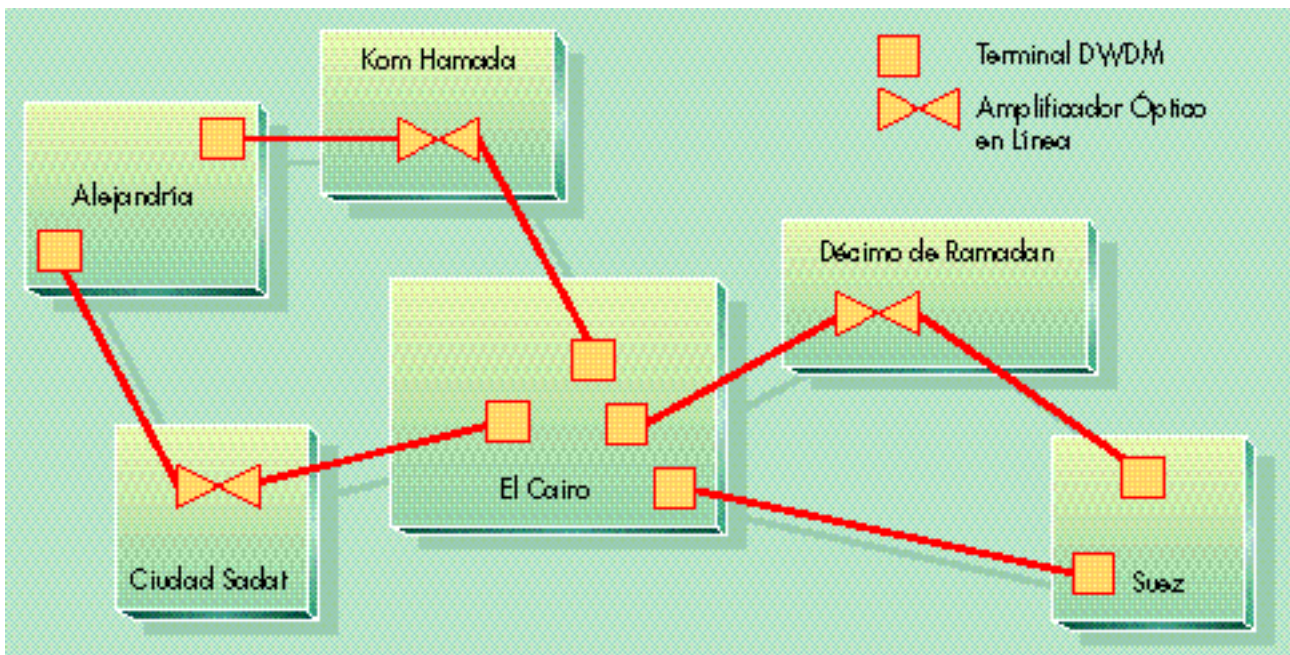


Figura 4 - Segmento 7 del SEA-ME-WE3, Egipto.

velocidades y formatos relativos no sólo a jerarquía SDH, sino también a la más temprana Jerarquía Digital Plesiócrona (PDH). En consecuencia, los multiplexadores/demultiplexadores han de ser suministrados con transpondedores capaces de adaptar una variedad de sistemas entrantes a los requisitos de la DWDM y de restaurarlos al formato original para los receptores existentes.

No de manera infrecuente, las rutas más congestionadas se encuentran equipadas con fibras que no proporcionan soporte óptico para DWDM. Esto incluye viejas fibras con alta dispersión por modo de polarización o fibras movidas por dispersión, que producen mezcla de cuatro ondas. En ambos casos, el sistema de multiplexación ha sido rediseñado cuidadosamente en todo lo que concierne a velocidad, número de canales y sección óptica.

Otro requisito emergente es la necesidad de soportar una sección de alta pérdida (en más de 40 dB), o unos pocos tramos de alta pérdida entre terminales, en los casos donde DWDM se utiliza sobre viejas rutas y áreas de alta densidad donde no hay sitio disponible para equipo de regeneración.

Durante el primer semestre de 1998, muchos operadores de telecomunica-

ciones han estado publicando concursos y llevando a cabo pruebas internas para valorar la tecnología y seleccionar a los proveedores apropiados. Este segundo semestre de 1998 estará más dedicado a pruebas de campo y al despliegue de tecnología en las aplicaciones de red más urgentes, cuyo despliegue general se iniciará en 1999.

Fuera de Europa y los Estados Unidos

En países fuera de Europa y ajenos al uso de los estándares ETSI, se espera que el despliegue a gran escala de DWDM comience en los próximos meses. Telmex de México, South Africa Telecom y MPT de China se encuentran entre los operadores más activos que se proponen aplicar la tecnología en sus redes de infraestructura a corto plazo.

Telmex ha programado un tendido de red de larga distancia consistente en anillos DWDM interconectados que soportan una capacidad total superior a 4x2,5Gbit/s, cada uno con una extensión de varios miles de kilómetros, uniendo las ciudades más importantes de México, tales como la ciudad de México, Celaya, Monterrey, Guadalajara y Hermosillo.

En China, se han publicado numerosos concursos para construir enlaces DWDM de ocho canales de larga distancia con protección de sección múltiple (MSP) proporcionada por terminales SDH.

Estos países se cuidan de escoger soluciones que integran estrechamente SDH y DWDM, y utilizan un sistema de gestión de red común.

Sistemas actuales

Las redes de infraestructura que están siendo desplegadas en estos momentos están haciendo un uso significativo de TDM de 10 Gbit/s, ante todo para aplicaciones punto-multipunto. Operadores de los Estados Unidos se han gastado cerca de 500 millones de dólares en tecnología OC-192 durante 1997; la mayor parte del crecimiento del mercado TDM durante los próximos tres a cinco años será el resultado de un incremento en el despliegue de 10 Gbit/s. Los sistemas de primera generación que hoy se encuentran en uso generalmente tienen un buen rendimiento de vano, alcanzando normalmente distancias de hasta 100 kilómetros antes de que sea necesaria la regeneración. En tanto que las características del modo de dispersión de al-

ta polarización y las técnicas de combinación de reflexión, utilizadas en algunas fibras anteriores, impiden el uso de tecnología de transmisión de 10 Gbit/s, puede emplearse la mayor parte de la planta de fibra simple instalada.

Donde se están construyendo nuevas redes, como en Qwest y Level 3 Communications, las fibras desplazadas de dispersión no-cero, tales como Corning LEAF, pueden utilizarse para conseguir vanos de 300 hasta 400 kilómetros con tecnología OC-192/STM-64 de primera generación. Este año están madurando los sistemas de 10 Gbit/s, proporcionando un mejor rendimiento de vano y capacidades más sofisticadas, tales como asignación de tiempo, anillos conmutados de líneas bidireccionales de cuatro fibras, y una variedad de interfaces tributarios, que anteriormente sólo se encontraban en sistemas de menor velocidad. En 1998, el despliegue de sistemas de 10 Gbit/s sobrepasará los 750 millones de dólares sólo en los Estados Unidos.

Al mismo tiempo, la DWDM de dieciséis canales se está ahora desarrollando ampliamente tanto en aplicaciones de 2,5 Gbit/s como de 10 Gbit/s. En la actualidad, el sistema de Alcatel es el de mayor capacidad disponible, ofreciendo hasta dieciséis canales de 10 Gbit/s y proporcionando una capacidad total de 160 Gbit/s por fibra. Estos sistemas continúan siendo utilizados ante todo en aplicaciones punto-multipunto desplegadas con anillos SONET de alta capacidad.

Ahora están apareciendo en el mercado sistemas DWDM de cuarenta canales, y se siguen realizando pruebas de laboratorio. Es destacable que los suministradores están haciendo publicidad en la que dicen que estos sistemas pueden ser escalados hasta un número de ochenta o más canales utilizando una de las dos técnicas. Los sistemas de dieciséis canales utilizados tienen cada uno una combinación de espaciado de 200 GHz sobre un amplificador de banda ancha (30 nm) o un espaciado de 100 GHz sobre un amplificador de ancho de banda estándar (20 nm). No obstante, construir un sistema de cuarenta canales requiere que cada uno utilice espaciado de 100 GHz sobre un amplificador de an-

cho de banda, o espaciado de 50 GHz sobre un amplificador estándar (Figura 5). El espaciado de 100 GHz, que equivale a 0,8 nm, es el espaciado más estrecho compatible con las actuales técnicas de transmisión de 10 Gbit/s. Debido a que la verdadera información de ancho de banda de una señal óptica digital es cerca del doble de la velocidad, y a que los filtros ópticos no son perfectamente estables, un espaciado de 50 GHz no proporciona suficiente margen para una señal de 10 Gbit/s. De todas formas, los sistemas de cuarenta canales que utilizan espaciado de 100 GHz ahora pueden alcanzar una capacidad de 400 Gbit/s por fibra, lo que significa un incremento de la capacidad de diez a uno en comparación con los sistemas que se desarrollaban hace dos años.

Los nuevos sistemas también ofrecen más funciones. La mayoría de estos sistemas ofrecen transpondedores asíncronos, o adaptadores de longitud de onda y pueden aceptar cualquier entrada óptica digital entre los 100 Mbit/s y los 2,5 Gbit/s, convirtiendo entonces la señal a una apropiada longitud de onda para su transporte sobre el sistema DWDM. Estos sistemas también soportan una limitada capacidad de inserción-extracción de la longitud de onda (de hasta ocho canales). En la actuali-

dad, la tecnología de conmutación fotónica limita la funcionalidad de inserción-extracción a longitudes de onda fijas que no pueden ser seleccionadas en el campo bajo control software. Tampoco permite cambiar la longitud de onda cuando la señal pasa a través del multiplexador de inserción-extracción. La alta pérdida de inserción de la tecnología de filtro y de la conmutación también limita el número de longitudes de onda que pueden ser insertadas-extraídas.

Incrementos futuros del ancho de banda

El inesperado ritmo de crecimiento de la demanda de capacidad durante los pasados meses, la imposibilidad de predecir posteriores incrementos que puedan generar los servicios de datos, la mayor competencia y la oportunidad de arrendar longitudes de onda (incluso a competidores) son factores que, en conjunto, han contribuido a que la política de los operadores se centre en el aumento de la capacidad sobre el número de canales que un sistema DWDM puede transportar de uno a otro punto. Es más, los operadores han prestado menos atención a la optimización y la gestión de la red. Esta visión de la nueva tecnología, en tanto que hace posible que las infraestructuras de red se esta-

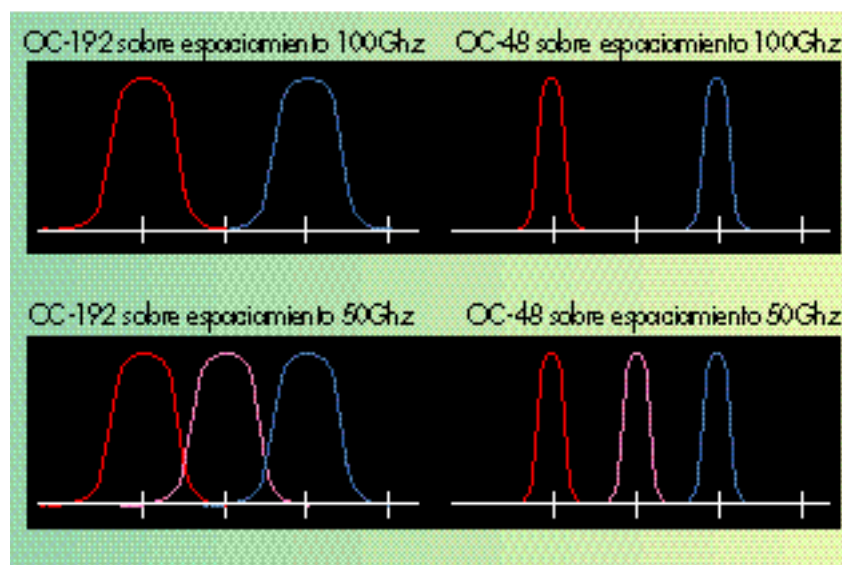


Figura 5 - Comparación entre espaciado 50 y 100 GHz; 50 GHz permite más canales pero no puede transportar OC-192 (10 GHz red UIT).

blezcan rápidamente, podrían producir algún grado de falta de homogeneidad tanto en la arquitectura de la red como en su gestión, afectando en consecuencia de manera negativa a la flexibilidad y la totalidad de los costes de operación, administración y mantenimiento.

En cualquier caso, es un hecho que en el plazo de dos a tres años se necesitarán sistemas DWDM con capacidades totales de más de 40 Gbit/s, cada uno de ellos multiplexando más de dieciséis 16 STM o proporcionando soporte a tributarios de 64 STM. En vista de los costes que esto implica y la enorme cantidad de tráfico que será transportada por estos sistemas, la optimización de la red, así como su protección y gestión, deberían de nuevo situarse como principales prioridades.

La tecnología amplificadora DWDM continúa impulsando el desarrollo de amplificadores de mayor ancho de banda y espaciamientos de canales más estrechos, en tanto que la tecnología TDM es la fuerza impulsora que reside tras el movimiento de la transmisión de 40 Gbit/s, e incluso más allá. En 1997, los laboratorios de investigación en todo el mundo se centraron en conseguir mayores sumas de longitud de onda, mayores velocidades, saltos más largos,

o alguna combinación de estos factores. Los experimentos que se discutieron en la reciente OFC'98 en San José, California, oscilaron desde cien longitudes de onda de canales de 10 Gbit/s sobre 400 kilómetros, por parte de Laboratorios Bell, hasta cuatro longitudes de onda de canales de 40 Gbit/s sobre 176 kilómetros, por parte de NTT. Las tecnologías que actualmente están siendo mostradas en los laboratorios de investigación comenzarán a aparecer en los sistemas comerciales en un plazo de tres a cinco años.

El objetivo último de estas actividades debe ser la optimización eficaz del número de longitudes de onda versus velocidad versus longitud de vano, para conseguir la solución más competitiva en coste para los operadores. No es suficiente con decir: este sistema es escalable de 40 hasta 80 canales, si la consecuencia es que la velocidad máxima es de 2,5 Gbit/s, lo que en efecto reduce a la mitad el ancho de banda total del sistema, pasando de 400 a 200 Gbit/s (**Figura 6**). En cualquier caso, si la mejora en la cantidad de canales se acompaña de mejoras en el amplificador o en la tecnología TDM que hagan posible que la velocidad se incremente o que el rendimiento del salto se mantenga, o mejo-

re de acuerdo con la capacidad aumentada, entonces se conseguirán beneficios económicos. La **Tabla 1** ilustra este concepto y muestra cómo ha disminuido desde 1994 el coste de un circuito de 600 kilómetros de OC-48 de 2,5 Gbit/s.

Existen muchas barreras frente a la expansión de más de 40 canales de 10 Gbit/s. La planta de fibra instalada está alcanzando el límite de su disponibilidad para transportar mayores velocidades. Aunque se están desarrollando fibras mejoradas para nuevas aplicaciones, estas tecnologías no resuelven todos los problemas relativos a la operación de velocidades más altas. Las no linealidades de fibra, como polarización y modo de dispersión, perjuicios de canal simple, así como dispersión Brillouin y modulación de autofase, junto con los viejos adversarios de la dispersión cromática y de la pérdida, harán extremadamente difícil conseguir transmisión económica a velocidades por encima de los 10 Gbit/s. Estas limitaciones probablemente impedirán que los sistemas comerciales de 40 Gbit/s y las cantidades de canales superiores a 100 puedan ser desplegadas antes del 2001. A corto plazo, las tecnologías de amplificación emergentes en la zona de los 1.300 nm, y por encima de la existente zona de

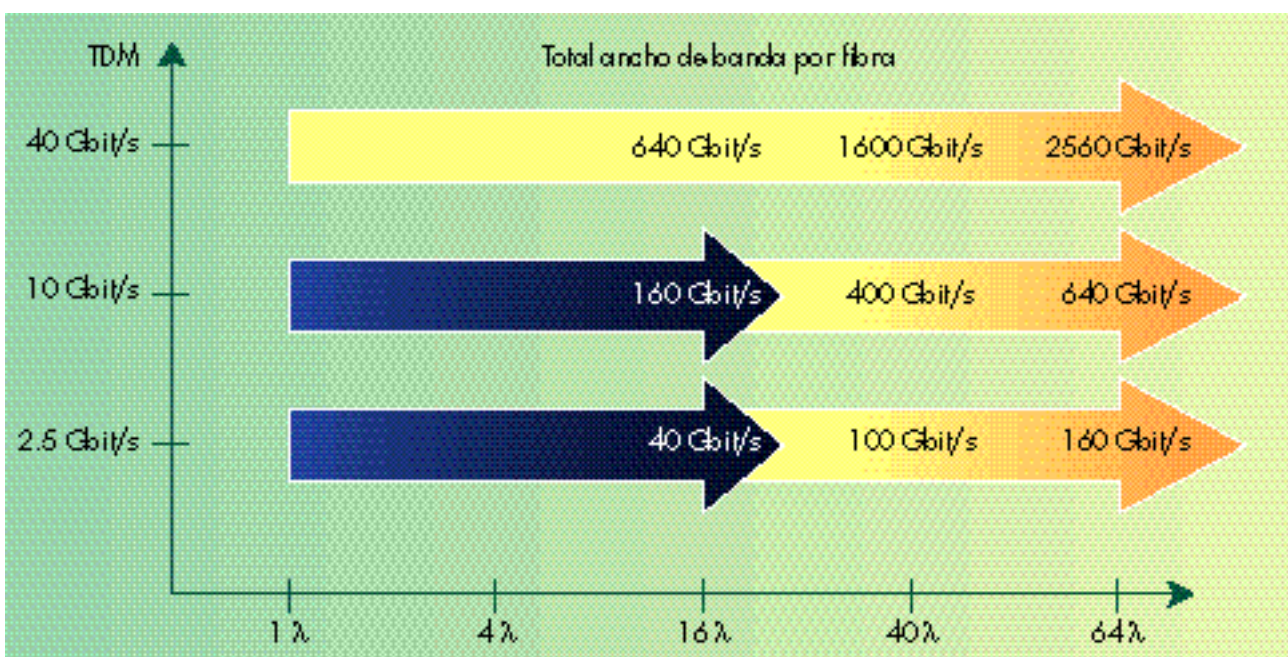


Figura 6 - Intercambio de suma de canales DWDM versus velocidad TDM para lograr el máximo ancho de banda.

Año por OC-48	Miles de \$ máximo (Gbit/s)	Caudal transmisión (Gbit/s)	Velocidad de longitudes de onda	Nº máx.
Pre 1994	750	2,5	2,5	1
1995	525	2,5	2,5	1
1995	199	10,0	2,5	4
1996	144	20,0	2,5	8
1996	117	40,0	2,5	16
1997	95	100,0	2,5	40
1998	?	400,0	10,0	40

Fuente: Ryan Hankin Kent

Tabla 1 - Disminución del coste de un circuito de 2,5 Gbit/s de 600 kilómetros.

1.550 nm, pueden proporcionar alguna ayuda para espaciar los canales de manera más estrecha, pero de nuevo la base de fibra instalada plantea limitaciones clave al ser la pérdida mayor en la zona de los 1.300 nm y tampoco estar controlada ni medida la dispersión cromática por encima de los 1.565 nm.

Algo más que WDM

Aunque, la DWDM ofrece a los operadores una forma de aliviar la congestión del tráfico y les ayuda a manejar la incertidumbre en cuanto al crecimiento del tráfico, y el enfoque principal aún reside en el número de canales por el producto de la distancia, está emergiendo la necesidad de elementos flexibles de red en la capa óptica.

A pesar de la búsqueda de más ancho de banda en redes de largo alcance, la disponibilidad de más longitudes de onda en la red abre nuevas oportunidades. Operadores de interconexión de segundo grado en los Estados Unidos, como Qwest e IXC, ya han establecido lucrativos negocios alquilando longitudes de onda individuales a otros operadores que necesitan ancho de banda, pero que no pueden afrontar el gasto o esperar el tiempo necesario para construir una nueva red. Por medio del alquiler de longitud de onda, el operador de segundo grado puede beneficiarse de la gran inversión de capital realizada en planta de fibra, sin renunciar a dar fibras oscuras enteras a sus clientes. Tal como destacó con acierto un planificador de red de operador, si vendo una fibra pue-

do tener un competidor, pero si alquilo una longitud de onda, tengo un cliente.

Este concepto de longitud de onda alquilada en la infraestructura de red es sólo el principio de la llamada capa óptica emergente. Más que centrarse estrictamente en conseguir aligerar la congestión de la fibra en la infraestructura de la red, los desarrollos de la tecnología fotónica se dirigirán a esta capa emergente con el objetivo de hacer realidad una más eficaz restauración de la red, agrupamiento de longitud de onda y, en último término, servicios de extremo-a-extremo basados en longitud de onda. Los conceptos que actualmente se aplican en el campo eléctrico, tales como asignación de tiempos e intercambio, conmutación de anillo restante y restauración de la malla de red, serán aplicados en la capa óptica. Las funciones de la red que actualmente se suministran por medio de multiplexadores SONET se están trasladando a la capa óptica, lo que en último término puede acelerar el fin del dispositivo de terminal SONET en solitario. Ya las ILAs están reemplazando a los regeneradores SONET, en tanto que los conmutadores de modo de transferencia asíncrona (ATM), los encaminadores de protocolo Internet (IP), y la próxima generación de transportadores de bucle digital están suministrando directamente interfaces SONET.

Integración europea

Volviendo a Europa, la integración económica está conduciendo a un aumento

del tráfico de telecomunicaciones sin fronteras y la evolución desde los enlaces capital a capital convencionales hacia redes más complejas basadas en las mismas rutas utilizadas por las personas y los bienes. En consecuencia, se necesita capacidad adicional en algunos segmentos de las redes existentes y ha de crearse nueva conectividad. Los operadores de operadores, como Hermes Europe Railtel, se están preparando para responder a estas necesidades mediante la construcción de redes extendidas multi-longitud de onda, que se expandirán progresivamente desde Europa central y del norte, hasta conectar todo el continente.

Además de la capacidad, el atender a los diversos operadores de telecomunicaciones en este entorno tan dinámico requiere alta flexibilidad de enrutamiento, transparencia a protocolos digitales múltiples y patrones de tráfico con diferentes estructuras lógicas y velocidades, así como optimización del ancho de banda mediante agrupamiento flexible.

Hacia redes de infraestructura IP/ATM

Con el tiempo, Internet superará a la voz en términos de volumen de tráfico internacional generado por los países europeos. De hecho, éste ya es el caso en Suecia, Reino Unido y Holanda.

Una cuestión clave para los operadores internacionales es cómo optimizar el soporte para tráfico IP, a la vista del proyectado crecimiento, y cómo pasar desde líneas alquiladas PDH/SDH entre enrutadores/conmutadores a red de infraestructura IP/ATM de operador de operadores. La necesidad de estas redes troncales para anchos de banda de gigabit impulsará tanto a la creación de potentes redes ópticas extendidas, capaces de transportar y enrutar flexiblemente a clientes de multigigabits, como a la escalabilidad de la capa cliente SDH a velocidades más altas, por ejemplo de 10 y 40 Gbit/s.

Como en el pasado, las redes submarinas están encabezando este movimiento. Los nuevos cables que cruzan el Atlántico y el Pacífico, y que se prevé entren en servicio en el año 2000, están

diseñados para soportar hasta 16x10 Gbit/s en cada par de fibras, proporcionando una capacidad total del cable de 640 Gbit/s.

Hacia la flexibilidad

Hoy en día las redes DWDM nacionales e internacionales constan de múltiples anillos interconectados a una malla. Los anillos lógicos son implementados al nivel SONET/SDH para proporcionar mecanismos de autocierre; las subredes se encuentran conectadas a través de multiplexadores de inserción-extracción o transconectores digitales (DXC) para enrutamiento del tráfico y agrupamiento. DWDM simplemente proporciona canales punto-a-punto de alta capacidad entre los nodos de acceso donde se encuentran conectados los flexibles elementos de la red SDH. La funcionalidad de gestión de estos canales a menudo se traslada a distancia desde el estándar de los elementos de red SONET/SDH a los más cercanos del portador físico.

La arquitectura de estas redes, que se basa en un enfoque SONET/SDH, no se beneficia del mismo nivel de flexibilidad al nivel de la capa óptica que proporciona TDM en la capa eléctrica. Los elementos de software reconfigurables de red óptica se introducirán en aproximadamente dos años para gestionar las longitudes de onda ya sean contenedores virtuales (VCs) de SDH o señales de transporte síncrono (STS) y tributarios virtuales (VT) de SONET. Esta evolución se verá asegurada por multiplexadores ópticos de inserción-extracción (OADM) y transconectores ópticos (OXC) capaces de realizar enrutamiento y traducción de longitud de onda. Una capa óptica lógica dando soporte a una red de canal óptico llegará a ser en realidad un gestor de tráfico de datos ultra-gigabit y servicios de longitud de onda y proporcionará restauración y protección del más alto orden en lo más elevado de la capa SONET/SDH (Figura 7).

Al llevar a cabo esta evolución, DWDM está afrontando un gran reto como es la transformación de una tecnología de transporte y multiplexación analógica en una tecnología de conectividad, principalmente dirigida a tráfico

de datos de alta calidad. La manejabilidad y control de la calidad del servicio (QoS) resultan esenciales para las funciones que se confiarán a la capa óptica. La integración, coordinación y sinergia con la capa SONET/SDH, en términos de funciones de protección y control, deben perseguirse para alcanzar una red competitiva en coste que ofrezca una alta calidad global.

Teniendo en cuenta las grandes infraestructuras SONET/SDH que existen en las redes de hoy en día y el creciente despliegue de los sistemas de gestión de red, la aproximación más eficaz a la evolución de la tecnología óptica es adoptar una arquitectura y un modelo tan próximos como sea posible a SONET o SDH. Éste es el enfoque que la UIT-T está siguiendo durante la estandarización para asegurar que la conectividad y la gestión de la capa óptica, y de las demás capas, no sean una pesadilla, sino una extensión sin fisuras de probados conceptos y soluciones.

Evolución de SONET y SDH

SONET y SDH no están ajenos a esta evolución. Una cuestión que se ha debatido extensamente es cuál resulta la mejor solución para alcanzar una capacidad superior a los 2,5 Gbit/s, si TDM o WDM. En la actualidad, DWDM ha probado que es más madura y efectiva en coste que TDM al venir a cubrir la urgente necesidad de ancho de banda. Ahora está evolucionando para crear una nueva capa por encima de SDH.

No obstante, el crecimiento del tráfico de datos y de los servicios de banda ancha, así como la creación de una nue-

va capa de red troncal, demandan nuevas funciones y mayores velocidades a la capa de cliente SDH. La concatenación VC, el enrutamiento y agrupamiento ATM/IP, la multiplexación STM-64 y las ópticas "coloreadas" para interactuar con los elementos ópticos son todos parte de la evolución de la red SONET/SDH que proseguirá en paralelo con el desarrollo de una capa óptica bajo el paraguas de la realización de una arquitectura y un enfoque de gestión comunes. La Figura 8 muestra el sistema de prueba de campo de Telecom Italia.

Red totalmente óptica

La red totalmente óptica del futuro dará soporte a una nueva clase de servicios de longitud de onda extremo-a-extremo de alto rendimiento para usuarios que requieran flexibilidad completa en sus necesidades de datos. Es urgente resolver numerosas cuestiones antes de que puedan suministrarse servicios de longitud extremo-a-extremo factibles.

Naturalmente, para ofrecer servicios basados en longitud de onda, la longitud de onda debe aparecer en las instalaciones de los usuarios finales. Esto significa que WDM debe encontrar su camino desde aplicaciones de red troncal hacia aplicaciones de redes de acceso locales. En cualquier caso, mientras la necesidad de aligerar la congestión de la fibra en redes de largo alcance represente un claro caso de negocio para WDM, es improbable que la congestión de la fibra sea el motor que impulse la introducción de WDM en redes locales de corto alcance.

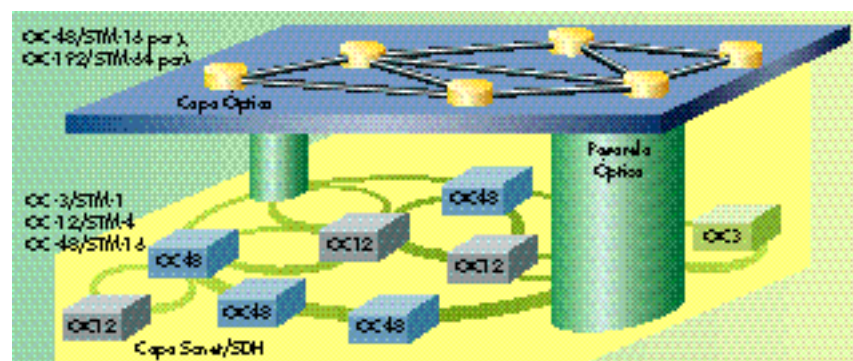


Figura 7 - Arquitectura desplegada SONET/SDH.

La congestión de la fibra aún no es un problema crítico en la mayoría de las redes locales y, donde lo es, en muchos casos puede instalarse fibra adicional en los conductos existentes de forma mucho más barata que desplegando un sistema WDM. No obstante, los fabricantes trabajan para reducir el coste de sus redes para aplicaciones de corto alcance eliminando la función amplificadora y utilizando láseres de menor coste y dispositivos de multiplex WDM más simples. Operadores telefónicos locales están llevando a cabo análisis económicos para determinar en qué momento instalar un sistema WDM comienza a ser más económico que tender más fibra. Entre tanto, los fabricantes continuarán recortando el coste de sus sistemas para conseguir estos objetivos mediante la optimización de diseños y economías de escala.

Un potente impulsor de WDM para la red local es la actividad de reforma de la Comisión Federal de Comunicaciones en los Estados Unidos, que al final podría requerir operadores telefónicos locales separados para diferenciar los precios de sus infraestructuras de red y permitir un acceso más competitivo. En cualquier caso, esto podría ocurrir años antes de que estas cuestiones estuvieran resueltas. La verdadera catarsis que puede llevar WDM a las redes locales podría ser su promesa de transparencia en ofrecer un nuevo y alto servicio final basado en longitud de onda. (La transparencia se refiere a la inde-

pendencia de velocidad y de protocolo de la capa óptica). Un servicio de longitud de onda potencialmente podría dar a los usuarios la flexibilidad para transportar cualquier clase de datos sin considerar las restricciones de la jerarquía digital SDH/SONET (**Figura 9**). Una combinación de voz, datos y video podría ser transportada en cualquier formato, y la velocidad de datos podría variar conforme fuera necesario, todo bajo el completo control del usuario final.

Actualmente, se están desarrollando sistemas WDM que ofrecen interfaces directas IP y ATM o interfaces puramente asíncronos, demostrando el potencial de la tecnología para aumentar el multiplexador SONET/SDH.

En el entorno local, la transparencia es una meta realista tanto técnica como económicamente. No obstante, en último término la longitud de onda tendrá que viajar sobre la red troncal en el caso del tráfico transcontinental o global. La transparencia es una cuestión significativa en las redes de largo alcance, donde la señal óptica todavía ha de ser regenerada ocasionalmente. Hoy, la tecnología para regeneración totalmente óptica sólo existe en los laboratorios de investigación [2, 3]. Tras la dispersión y los límites de señal a ruido que se han alcanzado a través de una serie de amplificadores en cascada, la señal WDM compuesta debe ser demultiplexada y cada canal Resincronizado, Reformado y Retransmitido (3R) eléctricamente. Esta clase de capacidad nunca puede ser

proporcionada en el dominio óptico sin la demultiplexación de canales. Como una fase de paso, se está considerando la regeneración opaca, en la que los regeneradores ópticos o eléctricos podrían acomodar múltiples velocidades de señales tales como STM-16, STM-64 y STM-256. El inconveniente de esta técnica es que la ingeniería del tramo debe ser hecha para el peor de los casos, lo que potencialmente aumenta el coste de la red. También el operador de red troncal deseará hacer completo uso de todas sus longitudes de onda a la velocidad más alta posible, y será improbable que esté dispuesto a usar una longitud de onda entera para un servicio que finalice en una red local a sólo unos cientos de megabits/segundo. No sólo se necesitarán transconectores ópticos fotónicos para conmutar y encaminar las longitudes de onda dinámicamente, sino que también se requerirá un método para proveer la transición entre redes transparentes de menor velocidad y redes opacas o de alta velocidad fija.

Por último, la mayor barrera para el servicio de longitud de onda extremo-a-extremo posiblemente se encuentre en el área de la gestión de la red. Después de más de doce años, la interoperatividad y gestión de SONET/SDH han alcanzado un cómodo nivel de madurez. Pocos operadores poseen el conocimiento y la experiencia para operar sistemas WDM en redes locales, y existen pocos estándares sobre cómo manejar mejor un circuito de longitud de onda sobre la red. A corto plazo, los fabricantes suministrarán sistemas de gestión propietarios para resolver estos problemas, pero deben alcanzarse acuerdos dentro de la industria, considerando el tipo de información que ha de supervisarse, la técnica utilizada para crear los canales de servicios ópticos y la forma en que estos canales han de ser supervisados y controlados utilizando sistemas de gestión de grandes operadores, tales como NMA de Bellcore y OPS/INE. Nuevos operadores locales competitivos serán capaces de implementar estos nuevos servicios tan pronto como no estén gravados por los sistemas de gestión existentes.

Dejando a un lado estos obstáculos, se espera que los servicios de longitud de onda aparezcan en aplicaciones em-

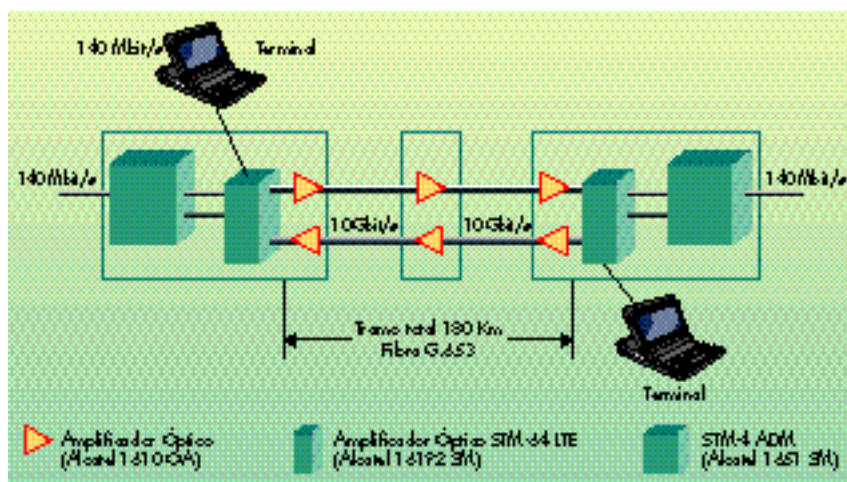


Figura 8 - Prueba de campo Milán-Turin de 10 Gbit/s de Telecom Italia.

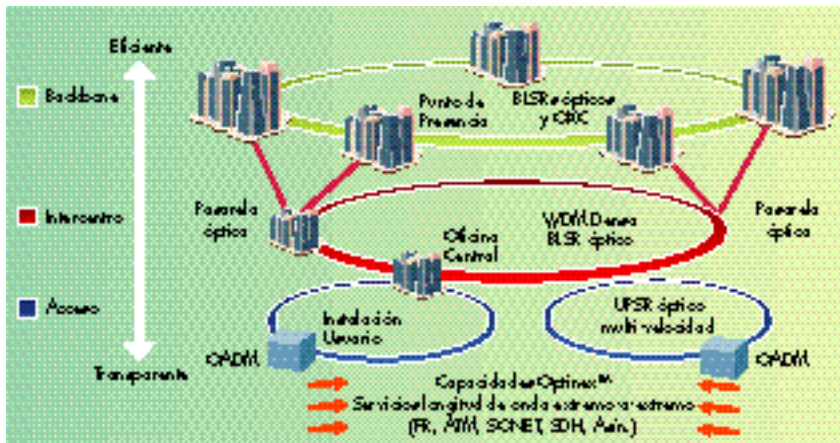


Figura 9 - La emergente red completamente óptica.
 BLSR - Anillo conmutado de línea bidireccional
 UPSR - Anillo conmutado de pasarela unidireccional

presariales de ámbito local durante los próximos doce a dieciocho meses. En cualquier caso, dentro de cinco años, productos WDM basados en anillo metropolitano con interfaces de datos directos, pasarelas ópticas para gestionar la transición entre redes locales altamente transparentes de menores velocidades y redes troncales opacas o de alta velocidad fija, transconectores ópticos basados en fotónica para conmutar y encaminar servicios de longitud de onda, productos basados en anillo bidireccional de capa óptica troncal, así como los necesarios sistemas de gestión, estarán disponibles de manera generalizada para el despliegue de una completa gama de servicios de longitud de onda.

Convergencia: eliminación de capas

La sustitución a gran escala de regeneradores SONET por ILAs ópticos es un temprano ejemplo del impacto que la tecnología DWDM va a tener sobre el mercado SONET/SDH. Es cierto que el terminal SONET/SDH está evolucionando de ser simplemente un multiplexor aislado a asumir funciones relacionadas con datos adicionales, como es el caso de encaminamiento IP. Del lado del acceso, las centrales de conmutación ATM, los enrutadores IP, la próxima generación de portadores de bucle digital (NGDLC) y otros equipos de usuario final están asumiendo más y más funciones de red con interfaces óp-

ticas protegidas. Del lado de la red, los fabricantes de equipos DWDM están proporcionando conexiones directas a estas interfaces de datos ópticas y asegurando el suministro con tecnología de restauración de la capa óptica. En cualquier caso, hay dos aspectos en esta cuestión: eliminación de equipos y eliminación de capas, tales como la capa de transporte SONET.

De forma clara, en sentido amplio se está eliminando, y continuará haciéndose, equipo de la red. Mientras, la integración de componentes nos permite unir funciones de numerosos subsistemas en un único subsistema para hacer que los elementos de la red de transporte sean capaces de manejar mayores velocidades en menores paquetes, permitiéndonos así la integración de red el multiplicar los elementos de red en una plataforma única. Se están diseñando transconectores digitales con puertos ópticos que soportan conmutación de anillos, mientras conmutadores ATM de extremo y enrutadores IP están ofreciendo directamente interfaces SONET. Al mismo tiempo, los elementos de red SONET/SDH están proporcionando funcionalidad de enrutamiento ATM básico, así como interfaces de datos, como de redes de área local Ethernet.

De cualquier forma, la convergencia a través de la eliminación de capas funcionales es más compleja. La reoptimización de la red pública para tráfico de datos determinará los resultados. Esto tendrá que ocurrir para tráfico de datos

de voz por primera vez en el 2001. El IP tiene un ímpetu tremendo como vehículo de servicios, y la batalla se centra en sí será transportado sobre celdas ATM para garantizar el suministro y la calidad del servicio. En un futuro previsible, SONET/SDH permanecerá como el mecanismo de empaquetamiento más adecuado para el transporte fiable.

Los analistas predicen que OC-48/SM-16 se está convirtiendo de hecho en el circuito gestionado de la red. Incluso los fabricantes de enrutadores IP y tecnología DWDM norteamericanos que solicitan la eliminación de la capa SONET por medio de la disponibilidad de interfaces de capa IP a óptica directos, están llevándolo a cabo por medio del suministro de interfaces compatibles en el lado IP, y con conversión a un canal acorde con UIT en el lado DWDM. La capa no ha sido eliminada, sólo redistribuida. De manera similar, las capacidades de la topología de anillo superviviente del equipo SONET no están siendo eliminadas, sólo redistribuidas en la capa óptica o en los transconectores digitales.

■ Conclusión

Al tiempo que la capa óptica surge como soporte de servicios basados en longitud de onda transportados sobre una red orientada a datos, se requieren nuevas clases de elementos de red. En la red de acceso, los multiplexores de empresa de bajo coste con interfaces de longitud de onda directas se requerirán para proporcionar conectividad a bajo coste al usuario final. Estos elementos soportarán interfaces ópticas de velocidades variables entre 100 Mbit/s a 2,5 Gbit/s; cada longitud de onda será de trayectoria protegida. Puede esperarse la integración de algunas funciones TDM, como capacidad de multiplexación limitada VT/VC o STS, y supervisión de rendimiento de trayectoria SONET/SDH. En la red troncal, aparecerán nuevos ADMs ópticos soportando multiplexación de inserción-extracción en el ámbito de longitud de onda y anillos bidireccionales de cuatro fibras en la capa óptica, en tanto que el número de longitudes de onda crecerá de 40 a 100 y la velocidad por canal de 2,5 Gbit/s a 10 Gbit/s y más allá. Dentro de

cinco años serán factibles ADMs ópticos capaces de gestionar numerosos terabits de ancho de banda.

Allí donde se interconectan las redes troncales y las de acceso, surgirán pasarelas ópticas y transconectores fotónicos. Las pasarelas ópticas reemplazarán a los transconectores de banda ancha para gestionar la conversión de transparente a opaco entre las redes de acceso y largo transporte, así como para gestionar la amplia gama de cargas útiles en los servicios de longitud de onda. Soportarán simultáneamente enrutamiento basado en celdas y suma de cargas útiles ATM o IP y servicios SM heredados. De esta forma, longitudes de onda de menores velocidades procedentes de la red de acceso se combinarán con canales UIT de alta velocidad en las redes de infraestructura. Finalmente, los transconectores ópticos fotónicos se utilizarán para proporcionar

restauración de volumen y agrupamiento de longitud de onda, conmutación y enrutamiento, para maximizar la economía y eficacia de la red completamente óptica.

■ Referencias

- 1 J. Chesnoy, O. Gautheron, L. Le Gourriérec, V. Lemaire: "Evolution of WDM Submarine Systems Towards Terabit/s Integrated Networks", *Revista de Telecomunicaciones de Alcatel*, 3^{er} Trimestre 1998, págs. 184-191.
- 2 J-L. Beylat, M.W. Chbat, A. Jourdan, P. A. Perrier: "Field Trials of All-Optical Networking based on Wavelength Conversion", *Revista de Telecomunicaciones de Alcatel*, 3^{er} Trimestre 1998, págs. 218-224.
- 3 F. Brillouet, F. Devaux, M. Renaud: "From Transmission to Processing: Challenges for New Optoelectronic Devices", *Revista de Telecomunicaciones de Alcatel*, 3^{er} Trimestre 1998, págs. 232-239.

Roberto Castelli es Director de Estrategia de Producto en la sede central de la división de Sistemas de Transmisión de Alcatel en Vimercate, Italia.

Tim Krause es Director Senior de Gestión de Línea de Productos para Redes Ópticas dentro de la Unidad de Negocio de Redes Ópticas de Alcatel Network Systems, Richardson, Texas. EE.UU.

FAMILIA DE PRODUCTOS OPTINEX

B. CLESCA

Optinex es una nueva familia de productos ópticos de transmisión multicanal que incluye desde sistemas de línea a distribuidores ópticos.

■ Introducción

La evolución de los sistemas de transmisión de línea desde los de canal único, basados en la Multiplexación por División en el Tiempo (TDM), a los multi-canal, basados en la Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM), ha llevado a un importante aumento de la anchura de banda soportada por la fibra óptica [1]. La capacidad total agregada que soporta una única fibra ha experimentado un gran aumento en los seis últimos años, como se muestra en la **Figura 1** que considera una velocidad binaria por canal de 2,5 Gbit/s. Este factor de crecimiento de 40 tiene en cuenta solamente los sistemas

que llevan tráfico real de los usuarios y se espera que pronto dicho factor se incremente a 80.

Después de la primera generación de sistemas WDM para aplicaciones de transmisión punto-a-punto, hay un número de factores que han llevado al uso de la longitud de onda como la entidad a gestionar en el núcleo de los elementos reconfigurables de red:

- No se requiere sincronización entre los tributarios, al contrario que en la Red Óptica Síncrona / Jerarquía Digital Síncrona (SONET/SDH).
- Potencialmente, los equipos son de tamaño mas pequeño y tienen mayor anchura de banda.

- La matriz de conexión interna es independiente de la velocidad y del formato de la señal.
- Los mecanismos de protección y restauración son eficientes y rápidos para grandes capacidades.
- Reducida carga de gestión de red.

En este artículo se describe el estado actual de las redes de transporte terrestre y su evolución para incluir una nueva *capa óptica*, y se revisan los productos Optinex de Alcatel que están diseñados para soportar varias arquitecturas de red, ofreciendo una mejora en la anchura de banda, en la flexibilidad y en la fiabilidad.

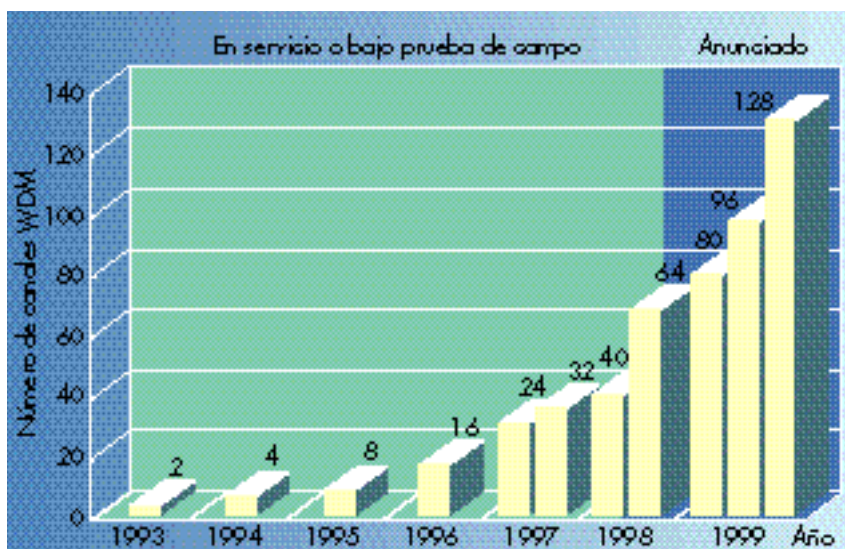


Figura 1 - Evolución del número de canales (generalmente OC-48/STM-16) soportado por una única fibra óptica para los sistemas de transmisión punto-a-punto.

■ Evolución hacia la Capa Óptica

Actualmente, existen dos capas básicas en la red de transporte:

- *Capa de servicios*: Envía servicios a los usuarios finales.
- *Capa SONET/SDH*: Soporta un número de importantes funciones, incluyendo multiplexación por división en el tiempo desde las señales de los tributarios eléctricos a las señales de los agregados, transporte de las tramas normalizadas vía interfaces ópticos, conexión flexible a nivel de espacio y de tiempo, conmutación de protección de alta velocidad cuando ocurre un fallo en el equipo o en la planta de fibra, y eficientes equipamiento y gestión de red.

Los nodos de red están basados en Multiplexores de Inserción-Extracción (ADM) y Transconectores Digitales (DXC). Consecuentemente, las señales ópticas que se propagan a través de la fibra tienen que ser convertidas en señales eléctricas a las entradas de los nodos, procesadas eléctricamente, encaminadas de acuerdo con la topología de la red, de la matriz de tráfico y de la necesidad de los operadores y, posteriormente, convertidas de nuevo en señales ópticas antes de ser transmitidas a otros nodos.

La necesidad de una nueva tecnología y de una nueva capa en la parte superior de las dos capas existentes (ver **Figura 2**) ha emergido como un requisito de las redes en continua expansión, del aumento de las demandas de anchura de banda, del cada vez más pesado tráfico SONET/SDH, que resulta cada vez más difícil de gestionar, y de las restricciones que presenta en la flexibilidad de la oferta de servicios.

Mediante la introducción de los ADMs ópticos Reconfigurables (ROADM) y de los Transconectores ópticos (OXC), se espera que esta evolución no solamente haga un mejor uso de la capacidad de la fibra, sino también que se proporcione una mayor flexibilidad, un mayor nivel de restauración y de protección y una reconfiguración dinámica del transporte a nivel del espa-

cio y de la longitud de onda [2]. Ambas capas, la óptica y la SONET/SDH, llevan a cabo funciones similares; sin embargo la capa óptica manejará portadores ópticos (a 2,5 Gbit/s ó 10 Gbit/s) en vez de contenedores virtuales SDH (con una capacidad de 155 Mbit/s o menor).

Con esta diferencia de granularidad decrecerá el tamaño, la complejidad y el coste de los nodos ópticos. Por ejemplo, las señales de tránsito de 2,5 Gbit/s pasarán a través de la matriz de conexión óptica sin ser demultiplexada en el dominio eléctrico. El equipo SONET/SDH impone esta etapa de demultiplexación debido a que la tecnología eléctrica actual de la matriz de conexión del ADM/DXC solamente permite procesar señales a la velocidad máxima de 155 Mbit/s.

Esta diferencia de enfoque llevará a una reducción significativa en el tamaño. Por ejemplo, el DXC de Alcatel más grande tiene 4096 x 4096 puertos STS-1 (51,8 Mbit/s), que corresponden a una anchura de banda eficaz de 212 Gbit/s. Por el contrario, el distribuidor óptico de Alcatel para 128 x 128 puertos de 10 Gbit/s, que corresponden a una anchura de banda eficaz de 1,28 Tbit/s, requerirá solamente una quinta parte del número de bastidores. Puesto que las tecnologías fotónicas están evolucionando rápidamente, en los próximos años se

esperan adicionales mejoras en el tamaño (y coste) de dichos equipos.

■ Revisión de los Productos Optinex de Alcatel

Hasta el momento se han desplegado en campo dos sistemas de línea WDM (el Alcatel 1610 OA para el mercado SONET y el Alcatel 1686 WM para el mercado SDH).

Estos sistemas ópticos de línea están diseñados para la transmisión punto a punto de ocho señales de 2,5 Gbit/s sobre una distancia de 640 km., o dieciséis señales de 2,5 Gbit/s sobre una distancia de 400 km. sin regeneración. En las entradas de ambos sistemas se usan Adaptadores de Longitud de Onda de Transmisión (TWA): estas unidades retransmiten las señales ópticas procedentes de los terminales SONET/SDH vía interfaces ópticas que emiten señales ópticas en la ventana de 1,3 μm o 1,5 μm, con las características ópticas requeridas para la transmisión WDM [1]. Esto se lleva a cabo mediante la conversión óptica/eléctrica/óptica en el interior de dichas unidades TWA.

En el caso del sistema Alcatel 1686 WM, el Adaptador de Longitud de Onda de Recepción (RWA) se puede usar a la salida del sistema para detectar con

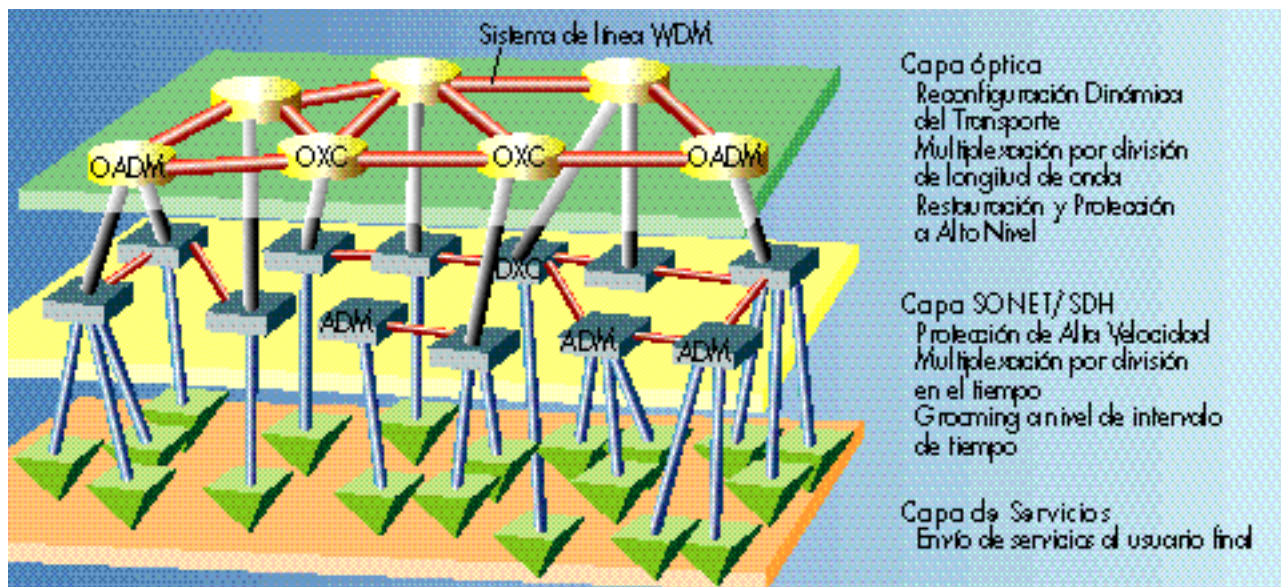


Figura 2 - Introducción de la capa óptica en la parte superior de las capas SONET/SDH y de servicios.

precisión las señales ópticas que se han corrompido por la propagación de la fibra y por el ruido del amplificador óptico. Si el lado receptor no se equipa con un RWA, cada salida del demultiplexador de fibra se conecta directamente al interfaz de recepción óptico de uno de los terminales SONET/SDH y, de esta manera, se recuperan las señales después de la demultiplexación de longitud de onda

Un adicional sistema WDM de línea (Alcatel 1640 OM-WM) ofrece una mayor capacidad (hasta 400 Gbit/s) para aplicaciones punto-a-punto, conjuntamente con unas limitadas capacidades multipunto-a-multipunto.

En una segunda fase se ofrecerá el distribuidor óptico (Alcatel 1650 ON) y el multiplexor de Inserción-Extracción (Alcatel 1660 OR) que permitirá el encaminamiento de longitud de onda en redes WDM.

Sistema de línea multi-canal Alcatel1640OM-WM

Alcatel 1640 es el nombre de una nueva plataforma para los mercados SONET (OM) y SDH (WM). Este sistema de línea está incluido en el catálogo Optinex, sumándose a los anteriores sistemas Alcatel 1610 OA y Alcatel 1686 WM. Dicho sistema ofrece una mayor capacidad de transporte (40 canales proporcionando hasta 400 Gbit/s en una fibra: 40x2,5 Gbit/s sobre 650 km., y 40x10 Gbit/s sobre 430km.) y una limitada funcionalidad de inserción-extracción óptica para aplicaciones lineales. En lo que respecta al número de canales y distancia de fibra, el sistema Alcatel 1640 OM-WM está

diseñado para completar los productos Alcatel 1610 OA y 1686 WM.

Plan de longitud de onda de canal

En la **Figura 3** se ejemplifica el plan de longitud de onda de canal del sistema Alcatel 1640 OM-WM, también se muestra, para su comparación, el plan para los sistemas Alcatel 1610 OA / 1686 WM. El nuevo plan de canal está de acuerdo con la red de frecuencias definidas en la Recomendación G.692 de la UIT-T [3], con una separación entre canales de 100 GHz. Adicionalmente a las señales WDM, existe una señal de Control Automático de Nivel (CAN) que tiene una longitud de onda de aproximadamente 1545 nm [4] y permite que la transmisión WDM sea insensible virtualmente a la carga del canal. Esta función, que ya está implantada en el sistema Alcatel 1686 WM, asegura que el Alcatel 1640 OM-WM pueda ser fácil y flexiblemente mejorado en términos de número de canales.

Adaptadores de longitud de onda de transmisión y recepción

Las señales ópticas no coloreadas son manipuladas por los adaptadores de longitud de onda de transmisión que adaptan las señales para la capa óptica. Su principal función es convertir la longitud de onda desconocida, en el margen de 1310 nm ó 1550 nm, a una longitud de onda fija que cumple con el plan de canal del Alcatel 1640 OM-WM, mediante el uso de la regeneración electrónica que incluye Retemporización, Reformateo y Retransmisión (3R) a 10 y 2,5 Gbit/s (ó 2R, sin retemporizar, para velocidades inferiores a 2,5 Gbit/s).

Los TWAs y RWAs también ofrecen un número de funciones opcionales configurables mediante software. En primer lugar, estas funciones pueden añadir un código de Corrección de Error en Recepción (FEC) a la señal para mejorar el margen de potencia óptica alcanzable. Este FEC, que difiere de la codificación dentro de banda usual que utilizan los competidores, es el resultado de aplicar la experiencia de Alcatel en el campo de los sistemas de cables submarinos [5]. Esto permite a Alcatel ofrecer un sistema con las mejores prestaciones de la industria. En segundo lugar, es posible controlar la calidad de la transmisión en la capa óptica, y entre el equipo SONET/SDH y los terminales WDM. Esta función única permite al operador localizar rápida y eficientemente un fallo dentro de la red.

Para poder interconectar el sistema Alcatel 1640 OM-WM con los equipos SONET/SDH de Alcatel equipados con interfaces ópticos coloreados [1], se ha desarrollado otro tipo de TWA/RWA con circuitos electrónicos que no son de alta velocidad. Todas las funciones opcionales de los adaptadores anteriores están soportadas a nivel de equipo SONET/SDH.

La **Figura 4** muestra la partición del bastidor del Alcatel 1640 OM-WM para un terminal bidireccional con una carga de canal de 40 señales WDM.

Amplificador óptico de doble etapa y canal de supervisión óptica

El amplificador óptico para el Alcatel 1640 OM-WM ofrece funciones adicionales comparadas con el diseñado para el Alcatel 1610 OA/1686 WM. La **Figura 5** muestra el diseño del amplificador. La unidad básica está equipada con dos fuentes de bombeo internas de tipo semiconductor que proporciona una potencia de salida de +14 dBm; no obstante, se puede requerir mas potencia óptica, dependiendo del número de canales, de la velocidad binaria por canal y de la longitud de la fibra entre dos terminales de línea. En este caso, la potencia de salida se puede aumentar hasta +20 dBm añadiendo unidades externas de bombeo en el bastidor de línea, que aloja las unidades de amplificación básicas. Consecuentemente, los clientes no necesi-

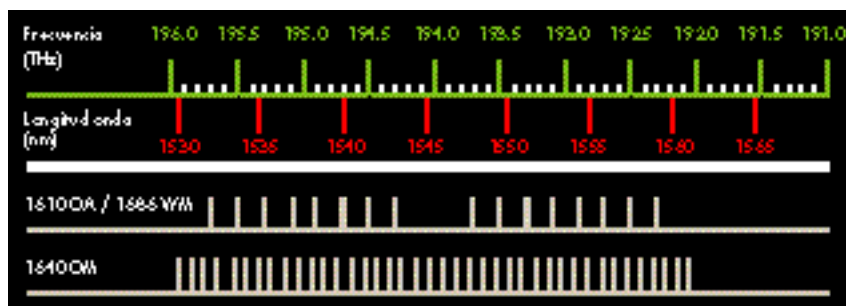


Figura 3 - Plan de longitudes de onda de los canales de los sistemas de transmisión WDM Alcatel1610 OA / 1686 WM y Alcatel1640 OM-WM, también se muestra la red de frecuencia/longitud de onda de la Recomendación G.692 de la UIT-T.

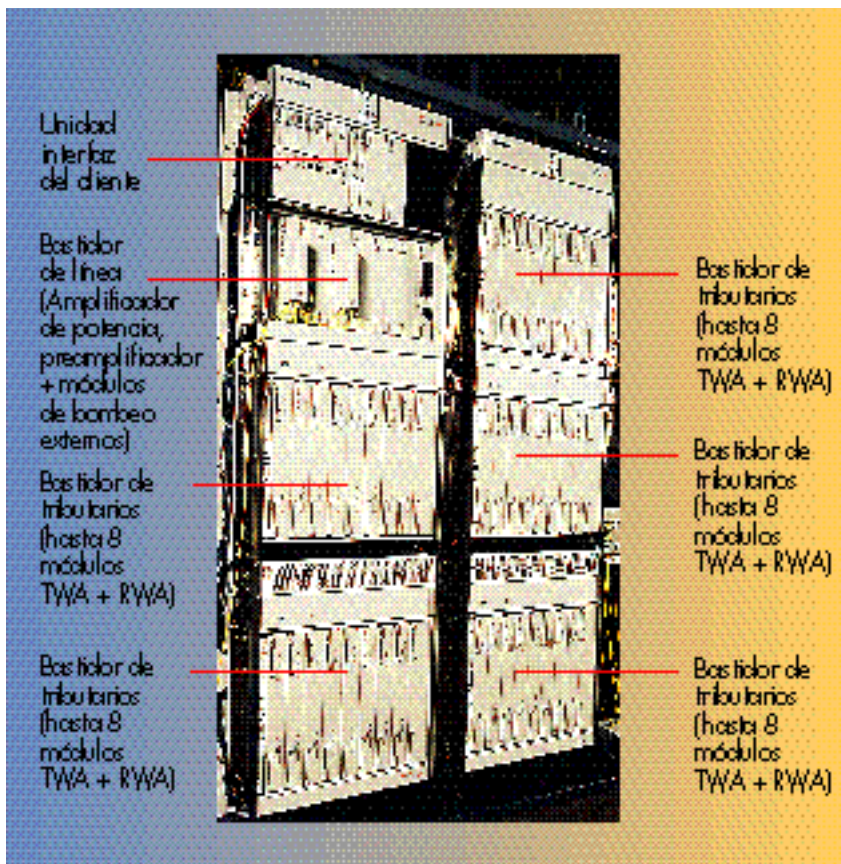


Figura 4 - Configuración de un terminal de 40 canales para un sistema bidireccional de un par de fibras con una capacidad agregada por fibra de hasta 400 Gbit/s.

tarán pagar por todas las prestaciones completas del amplificador cuando el sistema se ponga en servicio con una configuración limitada.

Con independencia de este propósito (potencia y preamplificador dentro de los terminales, o de los amplificadores de línea en los lugares de repetición), se usan las mismas unidades y el mismo bastidor de línea. Desde el punto de vista del cliente, esto supone una gran simplificación de la gestión de las unidades de repuesto.

Otra característica notable de este amplificador óptico es la posibilidad de acceso entre etapas que permite insertar funciones ópticas adicionales (por ejemplo, compensación de la dispersión cromática) en la línea sin afectar al margen de potencia entre amplificadores.

En el amplificador también se incluyen dos filtros ópticos para la extracción e inserción del Canal Óptico de Supervisión (OSC). El OSC consiste en una longitud de onda adicional que solamente

lleva información de gestión a las diferentes partes del sistema (canal de datos, hilo de órdenes de ingeniería, canal de servicio, servicio de mantenimiento y comandos). El canal óptico de supervisión viaja a lo largo de la fibra simultáneamente con las señales WDM. Su longitud de onda de 1510 nm cumple con la Recomendación G.962 de la UIT-T [3]. El OSC se extrae a la entrada del amplificador y se inserta de nuevo en la línea a la salida, asegurándose de esta manera que el OSC esté siempre disponible cuando ocurra un fallo en el amplificador o en la unidad de bombeo.

Función fija de inserción-extracción óptica

Se ha desarrollado un módulo que aprovecha la ventaja que ofrecen los amplificadores Alcatel 1640 OM-WM de disponer de acceso entre etapas, permitiendo realizar funciones de inserción y extracción limitadas en el dominio óptico. El término limitado se refiere al nú-

mero de canales WDM que se pueden utilizar para encaminamiento (hasta 4 de un total de 40 canales del multiplexor WDM). Este módulo consiste en filtros ópticos y conmutadores ópticos espaciales. El gestor de red se puede usar para configurar remotamente este multiplexor de inserción-extracción para cuatro longitudes de onda, realizando tránsito, extracción o inserción.

Distribuidor óptico Alcatel 1650 ON

Este producto (ON significa Optical Network) proporcionará un control en tiempo real para la restauración y reencaminamiento de la red, así como también la funcionalidad de un distribuidor óptico reconfigurable.

La **Figura 6** lista los tres tipos de conmutación en el dominio óptico en el caso de un distribuidor óptico conectado a varias fibras WDM:

- La conmutación de fibra interconecta una fibra de entrada a una fibra de salida (o a varias fibras de salida cuando tiene lugar la operación de multidifusión) sin modificar el contenido de cada fibra WDM.
- La conmutación de longitud de onda permite una mayor flexibilidad debido a que maneja las señales ópticas a nivel de longitud de onda: el tráfico procedente de cualquier fibra de entrada, soportada por cualquier longitud de onda, se puede encaminar a cualquier fibra o cualquiera de las fibras de salida usando la misma longitud de onda.
- La conversión de longitud de onda hace un uso más eficiente de la anchura de banda óptica: dos señales entrando en el distribuidor óptico, desde diferentes fibras de entrada, pero soportadas por la misma longitud de onda, pueden ser encaminadas a la misma fibra de salida.

A diferencia de lo que se muestra en la **Figura 6**, cada uno de los puertos de entrada y de salida de los distribuidores ópticos de Alcatel soportan un única longitud de onda. Por consiguiente, se requerirán unidades de demultiplexación y multiplexación para conectar al

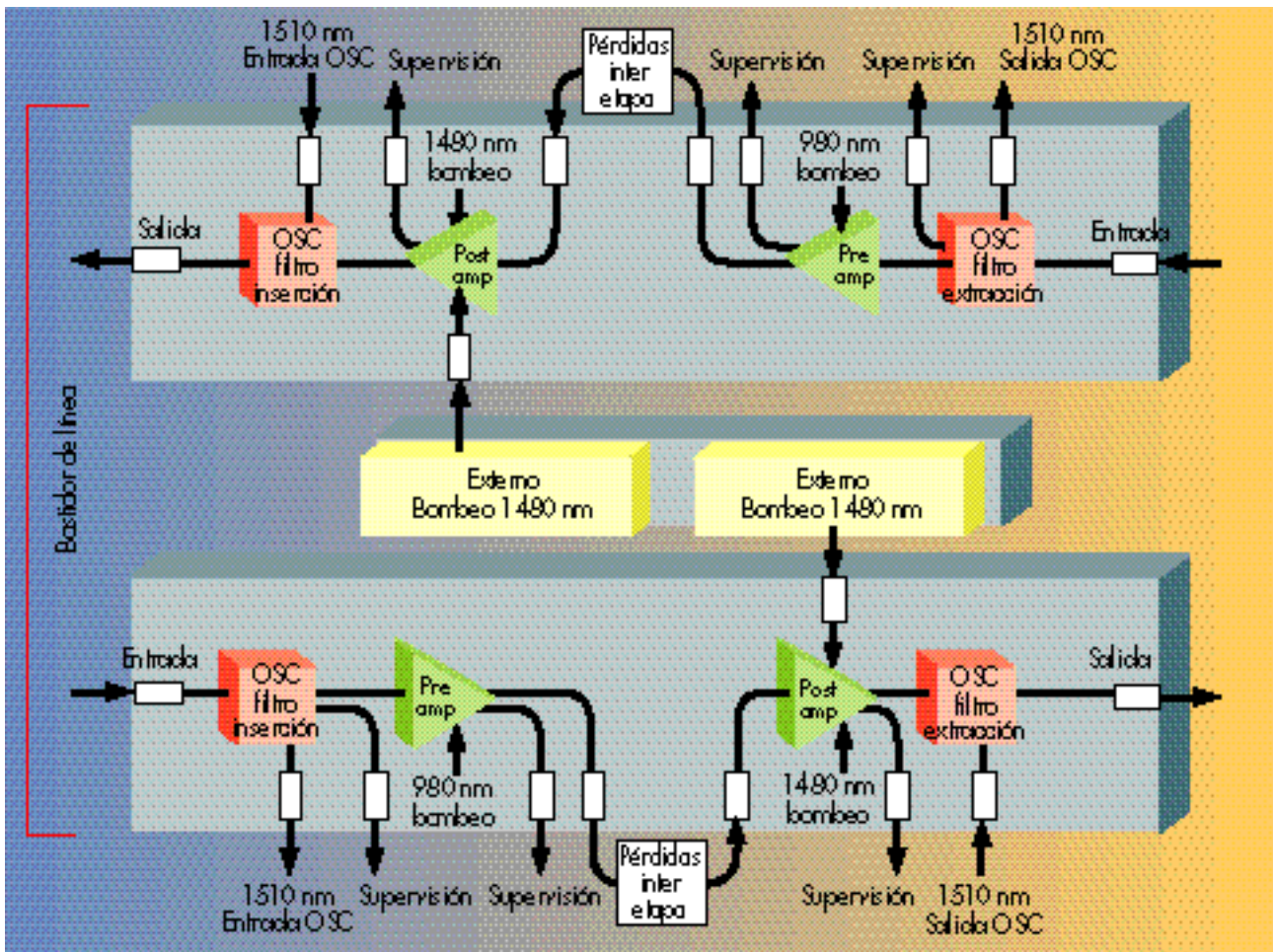


Figura 5 - Configuración del amplificador de doble etapa para el sistema Alcatel16400M-WM.

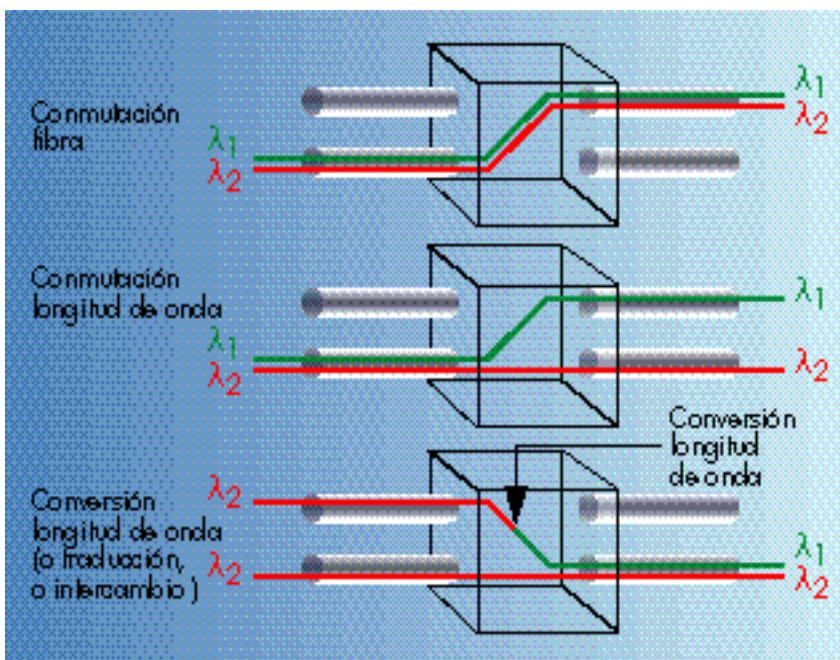


Figura 6 - Tres tipos de conmutación óptica.

equipo fibras WDM. El diseño de la matriz ha sido optimizado para un tamaño de 128x128, mejorable a 256x256.

De forma similar a su contrapartida eléctrica, el distribuidor óptico consistirá en tres subsistemas como se muestra en la **Figura 7**: subsistema de entrada/salida, subsistema de conmutación y subsistema de control.

El subsistema de entrada/salida proporciona los interfaces ópticos/eléctricos/ópticos a la línea e interfaces con las copias duplicadas del subsistema conmutador. Actualmente, se prevén velocidades binarias de hasta 10 Gbit/s por canal único.

Dentro del subsistema conmutador se realizan conexiones cruzadas entre los puertos de entrada y salida en base a la longitud de onda. El conmutador se basa en un diseño original de Alcatel que está siendo actualmente patentado. El dispositivo conmutador (o matriz de

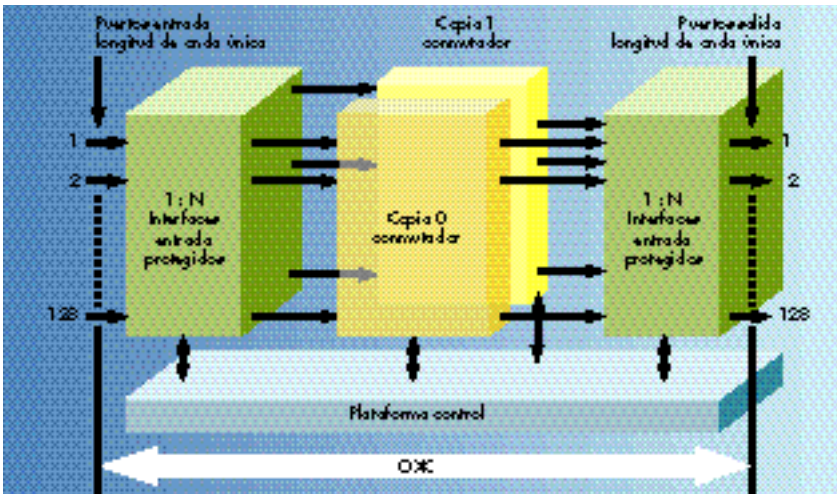


Figura 7 - Configuración del distribuidor óptico Alcatel 1650 ON.

conmutación) está duplicado para satisfacer los requisitos de fiabilidad y de mejora de prestaciones. El trayecto de la señal a través del dispositivo conmutador es óptico, sin ningún proceso eléctrico. La matriz sólo se equipa de acuerdo con la capacidad de puertos requerida, minimizando de esta manera los costes de la instalación inicial y del crecimiento futuro.

Otro requisito para un distribuidor óptico eficiente es la total conectividad en un modo estricto de no bloqueo. La matriz de conmutación del Alcatel 1650 ON está diseñada para proporcionar nuevas conexiones desde cualquier entrada libre a cualquier salida libre, sin afectar de manera alguna a la calidad de las conexiones existentes. La arquitectura seleccionada para el OXC Alcatel 1650 ON ofrece los tres tipos de conmutación óptica ilustrada en la Figura 6. Mirando a la historia de los DXCs, se espera que el número de puertos de entrada/salida requeridos aumente muy rápidamente desde el diseño actual (128x128 y 256x256) hasta al menos 1024x1024.

Finalmente, el subsistema de control supervisará todas las funciones de Operación, Administración, Mantenimiento y Provisión (OAM&P) relacionadas con el transconector óptico.

Multiplexor óptico de inserción-extracción reconfigurable

El objetivo del Alcatel 1660 OR (OR significa Optical Ring) es ofrecer a las re-

des actuales de los operadores basadas en anillos un elemento óptico reconfigurable de red que proporcione una funcionalidad similar a la de los ADMs SONET/SDH. Este producto se extenderá por el catálogo de productos Optinex, haciéndolo totalmente consistente:

- El Alcatel 1640 OM-WM, para las aplicaciones de transporte punto-a-punto con una limitada funcionalidad de multiplexor de inserción-extracción para configuraciones lineales de red.
- El Alcatel 1660 OR, para aplicaciones en anillo con una mayor conectividad y subsistemas de protección de red.
- El Alcatel 1650 ON, para distribución óptica de un gran número de puertos entrada/salida con total conectividad.

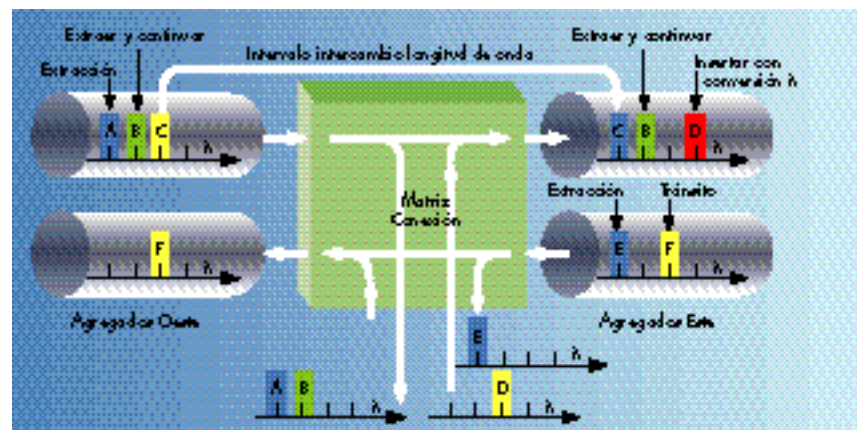


Figura 8 - Principio y funciones del multiplexor óptico de inserción-extracción reconfigurable.

La Figura 8 ilustra la funcionalidad deseada del ADM reconfigurable: extracción, extraer y continuar (una característica clave para interconexión de anillos), inserción y tránsito (con o sin intercambio de longitud de onda).

Las principales diferencias entre R-OADM y OXC son el tamaño de la matriz, la conectividad de la misma y los sistemas de protección requeridos para las aplicaciones de anillo. Todas estas características han sido rigurosamente evaluadas por Alcatel usando MADO, que es un demostrador de 3 nodos [2].

La Figura 9 muestra la configuración del R-OADM para su uso en un anillo de 4 fibras. La protección de red bloquea los conmutadores y las señales de reencaminamiento en el caso de fallo del enlace. La matriz de conexión está duplicada a efectos de fiabilidad y adecuación futura. En los subsistemas tributarios también se implementan algunas facilidades de protección.

Hablando en general, las matrices ópticas de conexión de los OXC o de los R-OADM encaminan señales ópticas. Los interfaces de transmisión/recepción se pueden utilizar en los extremos de la matriz, pero el núcleo de la matriz es puramente óptica y transparente a la velocidad binaria y al formato de la señal. Por ejemplo, un circuito óptico de encaminamiento que fuese inicialmente diseñado para operación a 2,5 Gbit/s se puede reutilizar con canales a 10 Gbit/s.

Como una primera etapa, se ha planificado reutilizar el subsistema de control de los DXCs y ADMs, permitiendo a

Alcatel usar su valiosa experiencia con los DXCs y ADMs SONET/SDH y ofrecer a los clientes elementos ópticos reconfigurables que les sean familiares. El personal experto de los operadores de red, los ingenieros de prueba, el personal de mantenimiento y los operadores de la gestión encontrarán que esta similitud con los actuales nodos SONET/SDH facilitará la integración de la red y simplificará el despliegue de la misma.

■ Conclusión

Como una siguiente etapa en el catálogo Optinex, el Alcatel 1640 OM-WM ofrecerá 40 canales multiplexados, con una capacidad por fibra de 400 Gbit/s sobre una distancia de 430 km. entre puntos de regeneración. Este equipo se ofrece en adición a los sistemas Alcatel 1610 OA/1686 WM que están diseñados para aplicaciones en donde sea suficiente un producto de capacidad x distancia más pequeña. Se obtendrán unas prestaciones superiores de transmisión mediante el uso de un único y potente

código de corrección de error FEC fuera de banda. El concepto de pago por longitud de onda, seguido durante el diseño del Alcatel 1640 OM-WM, conduce a un significativo ahorro de coste, tanto durante el despliegue inicial como en posteriores crecimientos en términos de capacidad.

Se están planificando equipos ópticos más flexibles con la introducción del distribuidor óptico Alcatel 1650 ON y el multiplexor óptico de inserción-extracción reconfigurable Alcatel 1660 OR. Es posible diseñar el núcleo óptico de la matriz de conexión de manera que este subsistema, clave de dichas unidades reconfigurables, sea totalmente transparente a la velocidad binaria y al formato de las señales a ser encaminadas. Sin embargo, en los próximos años, se prevén algunos interfaces ópticos/eléctricos/ópticos para fijar las señales ópticas que entran al equipo y proporcionar la posibilidad de garantizar y medir la calidad de la señal. Esta idea seguirá al despliegue de los elementos ópticos de red digitales u opacos, que serán más fáciles de gestionar. En otro orden de cosas, Alcatel realiza in-

tenso esfuerzos para investigar la transparencia óptica para el futuro de la capa óptica [6, 7].

El catálogo de producto Optinex está dirigido a proporcionar nuevos elementos ópticos de red reconfigurables que son flexibles, fiables, eficientes en coste y diseñados para cubrir las necesidades de las redes de hoy y del mañana. Se ofrecerá una mejora en servicios y sucesivos incrementos en términos de capacidad. Todos los productos Optinex obtendrán ventaja de la valiosa experiencia e historia de investigación, desarrollo y de la exitosa implantación de los equipos de SONET/SDH. La integración de estos nuevos elementos ópticos de red dentro de los gestores de red de Alcatel facilitará y simplificará el despliegue, el mantenimiento y la gestión de la red.

Consecuentemente, la familia de productos Optinex satisfará el constante incremento de la demanda para la provisión, a coste competitivo, de anchura de banda con una mayor capacidad, mayor flexibilidad y mejorada fiabilidad y supervivencia.

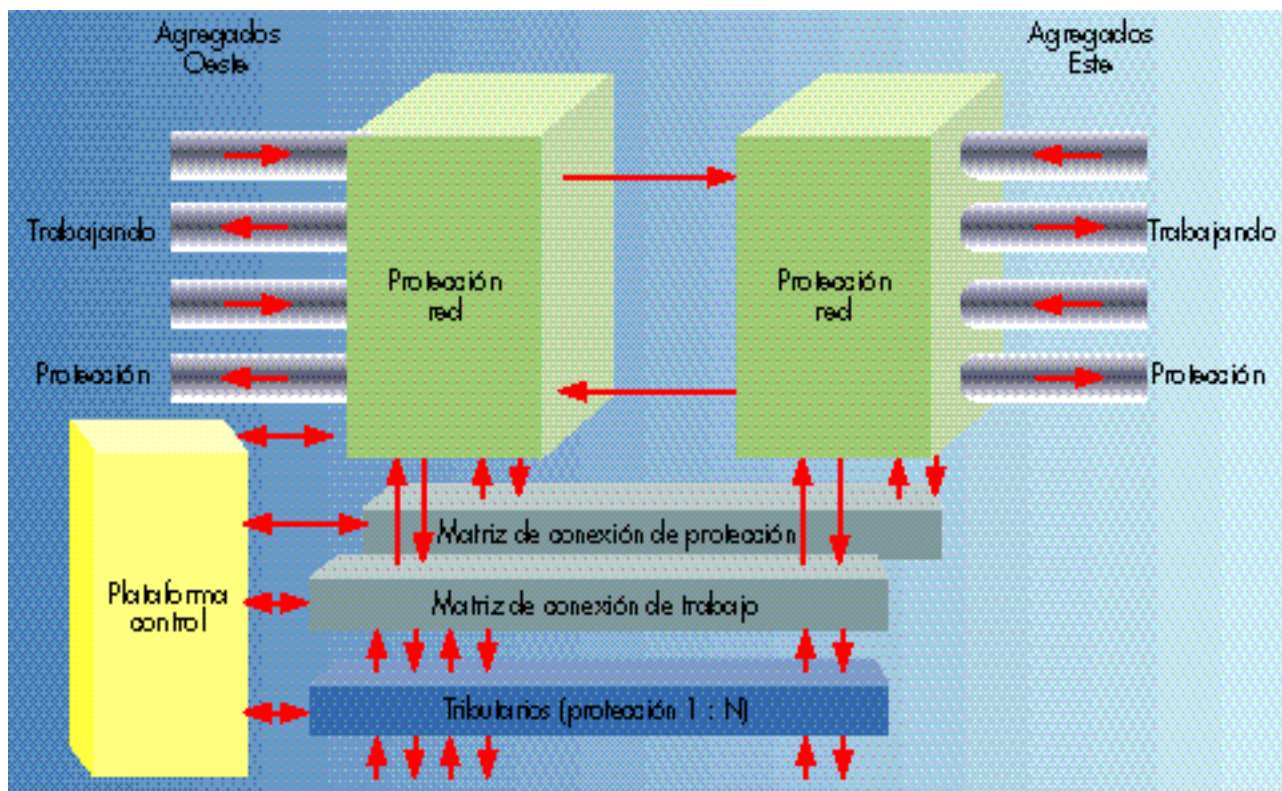


Figura 9 - Configuración de un R-OADM para el despliegue en un anillo de 4 fibras.

■ Referencias

- 1 R. Castelli, T. Krause: "Tendencia del Mercado y Evolución de los Sistemas de Transmisión ópticos" *Revista de Telecomunicaciones de Alcatel*, 3er Trimestre 1998, págs. 165-175.
- 2 J. Dupraz, F-X. Ollivier, P.A. Perrier: "Una Nueva Capa Fotónica para Redes de Banda Ancha", *Revista de Telecomunicaciones de Alcatel*, 1er Trimestre 1998, págs. 47-54.
- 3 Recomendación G.692 de la UIT-T, 1998.
- 4 B. Clesca y otros: "Upper Limit and Control Scheme for Power per Channel in Optically-Amplified WDM Systems", *Proceedings of the 22nd European Conference on Optical Communication*, volume 3, artículo WeP.31, págs.3.333-3.336; Oslo, Noruega, 15-19, Septiembre 1996.
- 5 S.R. Barnes, J. Devos, P.M.Gabla, y B. Le Mouél: "150 Años de Sistemas de Cable Submarino - desde el Código de Morse a la ciber-conversación", *Revista de Telecomunicaciones de Alcatel*, 1er Trimestre 1997, págs. 55-62.
- 6 J.-L. Beylat, M. Chbat, A. Jourdan, P.A.Perrier: "Pruebas de Campo de Red todo Óptica Basada en Conversión de Longitud de Onda", *Revista de Telecomunicaciones de Alcatel*, 3er Trimestre 1998, págs. 218-224.
- 7 F. Brillouet, F. Devaux, M.Renaud: "Desde la Transmisión al Proceso: Retos para Nuevos Dispositivos Optoelectrónicos", *Revista de Telecomunicaciones de Alcatel*, 3er Trimestre 1998, págs. 232-239.

Bertrand Clesca es Jefe de Producto de los Elementos Ópticos Reconfigurables de Red dentro de la División de Sistemas de Transmisión de Alcatel en Villarceaux, Francia.

EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS SUBMARINOS WDM HACIA REDES INTEGRADAS DE TERABIT/S

J. CHESNOY
O. GAUTHERON
L. LE GOURRIÉREC
V. LEMAIRE

El sistema submarino Alcatel OALW160 de 160 Gbit/s es el siguiente paso para alcanzar capacidades de fibra de terabit por segundo.

■ Introducción

La tecnología de multiplexación óptica de longitudes de onda (WDM) se ha estudiado, durante largo tiempo, en la mayoría de los laboratorios de investigación en telecomunicaciones, debido a su enorme potencial para las aplicaciones de transmisión y reconducción de señales. El mercado de los sistemas de telecomunicación submarina fue el primero en apreciar y emplear las grandes cualidades ofrecidas por esta tecnología en aumento de conectividad y de capacidad. La División de Redes Submarinas de Alcatel (SND) ha contribuido decisivamente para la introducción de la tecnología WDM en el mundo de las comunicaciones submarinas, liderando el mercado en varios aspectos técnicos de dicha tecnología. SND está fabricando e instalando sus primeras redes (Gemini, SEA-ME-WE3, Atlantis, China-US, etc.) emple-

ando la gran capacidad, conectividad y flexibilidad ofrecida por la gama de productos OALW 16. Además, ofrece actualmente la nueva familia OALW 160 que posee una capacidad de 160 Gbit/s por par de fibra y 10 Gbit/s, por lo que es adecuada para su uso en futuras redes.

■ Características de la Red Actual con OALW16

Sistema 82,5 Gbit/s

La gama del producto OALW16 se describe en detalle en otros apartados en términos de diseño de línea (1, 2, 3) y producto (4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12). En este apartado se describen las características del producto examinando varias redes que lo incorporan (Gemini, SEA-ME-WE3 y China-US) y analizando cómo verifica y satisface las ne-

cesidades de los clientes. La **Figura 1** muestra los principales elementos de la red.

Gemini

Gemini es una red que une Londres y la ciudad de Nueva York. Consta de dos cables submarinos que cubren la sección Atlántica de una red de tres anillos entre ambas ciudades.

La red se diseñó en 1996 para satisfacer la necesidad de gran capacidad, unida a la de muy alta calidad y disponibilidad. Además, tenía que desarrollarse muy rápidamente. La **Figura 2** muestra la arquitectura de la red. Debido a esta urgencia el sistema submarino tuvo que diseñarse e instalarse utilizando la tecnología existente (5 Gbit/s) permitiéndose que pudiera ser aumentada a 4x2,5 Gbit/s cuando estuvieron disponibles los productos WDM. Después de esto, se realizaron medidas detalladas del cable más meridional que indicaban que podría soportar un mayor número de longitudes de onda.

Hubo que alcanzar ciertos compromisos para garantizar la posibilidad de una ampliación futura y para cumplir con los cortos plazos de tiempo. La fibra utilizada en la primera sección tenía una dispersión cromática de 0,6 ps/nm/km, en vez de 2 ps/nm/km, que era el valor nominal de los sistemas submarinos WDM vigentes en ese momento. Esto limita la potencia de salida de los repetidores a aproximadamente 7 dBm para un sistema con ocho longitudes de onda, con lo que se

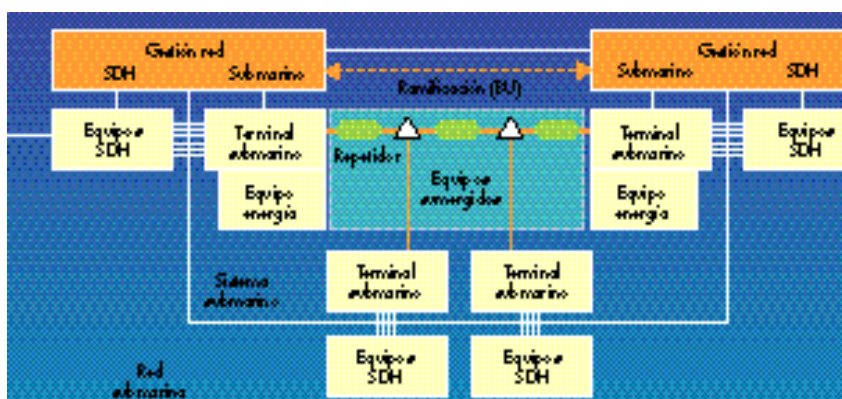


Figura 1 – Productos de red submarina.

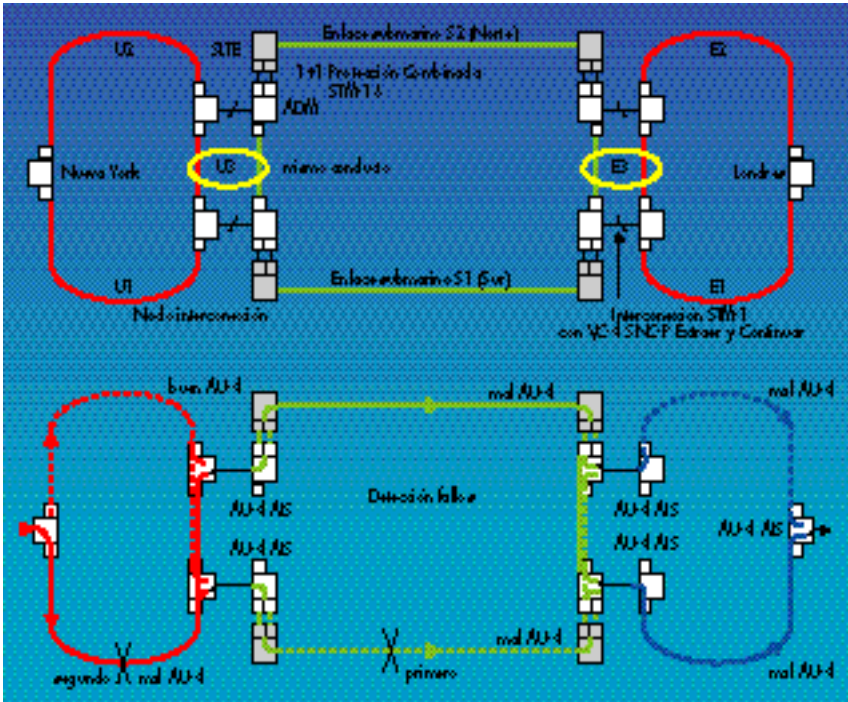


Figura 2 – Protección red Gemini.

necesitan más repetidores que los que emplearía un sistema óptico.

La configuración de la red está basada en el multiplexor de inserción-extracción Alcatel 1664 SM con protección de vía asociado con extraer-y-continuar (drop-and-continue) para conectar los diferentes anillos. La red ofrece una gran disponibilidad pues su mecanismo de protección es robusto frente a numerosos fallos y opera a 50 ms, incluso para largas distancias.

SEA-ME-WE 3

SEA-ME-WE3 incorpora todas las características 8x2,5 Gbit/s ofrecidas por el sistema OALW 16. Además, se han utilizado dos funciones fundamentales diferentes a las empleadas en Gemini.

Primeramente, las conexiones se han realizado utilizando unidades de ramificación WDM, lo que posibilita conectar un mayor número de ramas a cada tronco. La **Figura 3** muestra las instalaciones de conexión empleadas en el segmento 2 del sistema SEA-ME-WE 3. Se ha llevado a cabo la variación de una a tres longitudes de onda, ramificaciones de las ramas y conexiones WDM entre las ramas.

En segundo lugar, la función E-OTDR (Extended Optical Time Domain Reflectometry) permite realizar comprobaciones de reflectometría óptica en el dominio del tiempo de la línea a través de los amplificadores ópticos y las unidades de ramificación cuando la transmisión no está operati-

va, de forma que se puede detectar con precisión cualquier defecto en el camino óptico. La **Figura 4** muestra una curva de atenuación calculada empleando el equipo E-OTDR.

China-US

En este proyecto se ha estudiado cuidadosamente la propagación. Actualmente son factibles distancias de transmisión de hasta 12.000 km. sin regeneración para plantas submarinas. La viabilidad de utilizar tan largas distancias se ha estudiado en experimentos a circuito cerrado. Para ultimar esta validación e integrar los equipos de diferentes suministradores se están llevando a cabo experimentos completos con distancias de 10.000 km.

La **Figura 5** muestra la importancia del Equipo de Protección de Red (NPE) en una red transoceánica, donde la capacidad es un parámetro fundamental. El NPE incrementa la protección estándar de 4 fibras MS-Spring, evitando el loopback en nodos adyacentes al fallo. Un protocolo muy sofisticado asegura que el tráfico se reenca mine siempre desde el nodo original.

Otras características

Otras características que no poseía el sistema OALW 16 y que si se emplean en estos contratos son las siguientes:

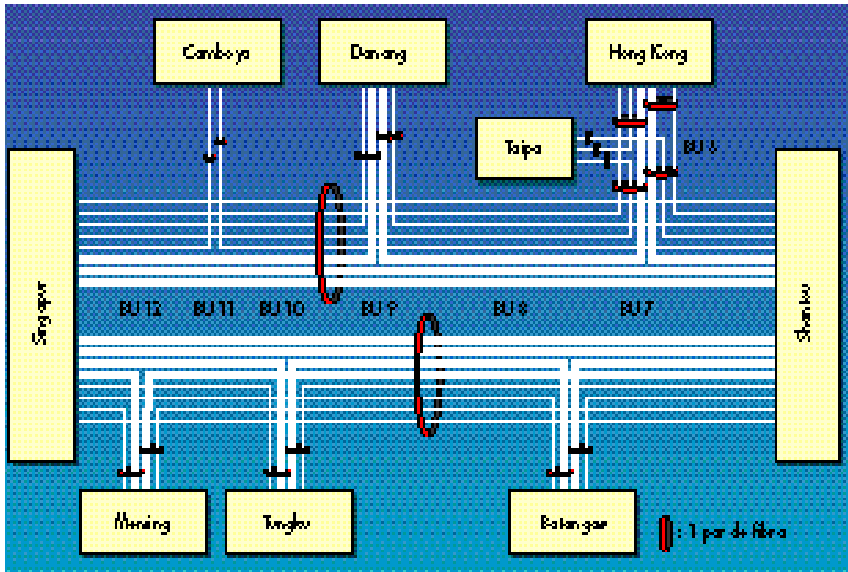


Figura 3 – Conectividad del segmento 2 del SEA-ME-WE 3; las líneas gruesas muestran la conectividad inicial, mientras que las líneas finas muestran las mejoras futuras.

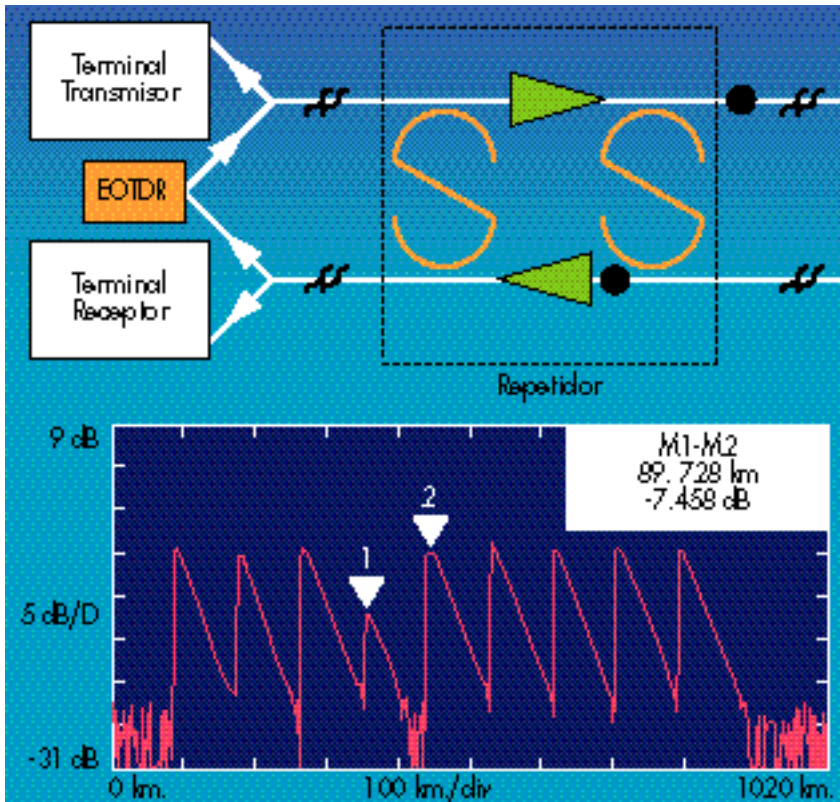


Figura 4 – E-OTDR.

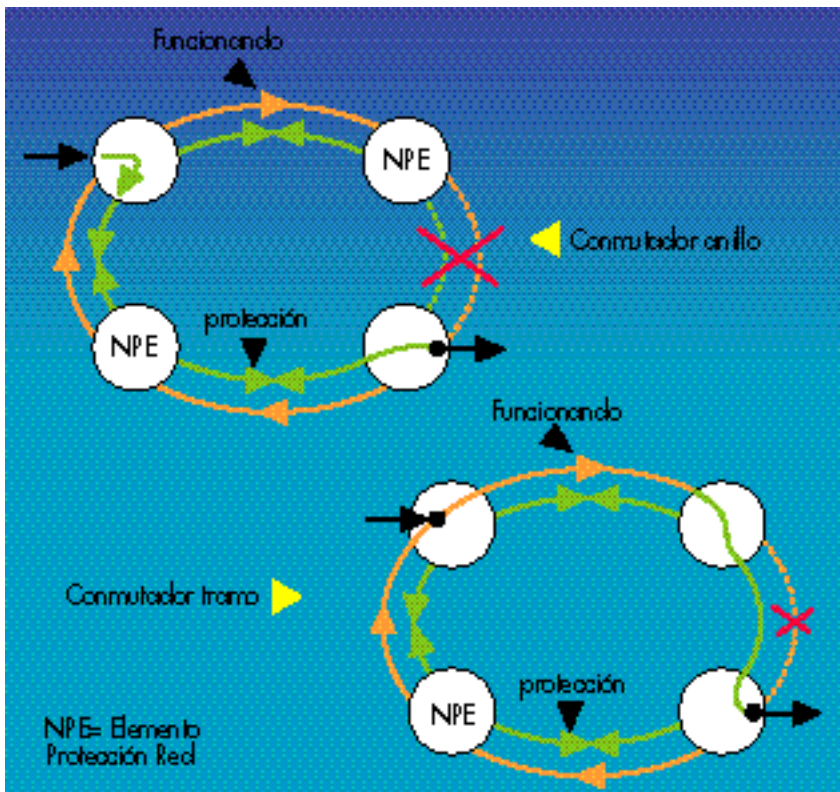


Figura 5 – Mecanismo de protección NPE.

- Un repetidor que ofrece la flexibilidad necesaria para ser utilizado con repetidores de otros suministradores. Esto es posible incluso si el método supervisor empleado por estos repetidores es diferente. La flexibilidad del diseño interno del repetidor de Alcatel permite la compatibilidad con los métodos supervisores de compañías competidoras usando componentes específicos. Esto se ha llevado a cabo en Columbus III.
- Características NPE en el ADM (Multiplexador Inserción-Extracción)
- Un equipo de alimentación eléctrica en conjunción con unidades de ramificación controladas eléctricamente y un sistema de control de la electricidad forman, en su conjunto, un sistema fácil de instalar y robusto ante fallos en los equipos o cables.
- Sistema de control de la red submarina (Alcatel 1354 SN) que combina el uso de tecnología WDM (la única completamente desarrollada actualmente en Alcatel) para lograr la conectividad necesaria y el sistema de control de red submarina y de equipos desarrollado por el Alcatel 1353 SH.

Evolución al sistema 16 x 2,5 Gbit/s

No sólo es la máxima capacidad jamás instalada en sistemas de transmisión, sino que además la longitud del sistema (por encima de los 9.000 km.) conlleva unos requisitos de estabilidad de la ganancia del amplificador y de compensación de la dispersión cromática, que son un desafío tecnológico considerable. Esta tecnología será utilizada por primera vez en el sistema Southern Cross.

Para conseguir la estabilidad adecuada de la ganancia se combina una fibra codopada con aluminio, un filtro de estabilización de la ganancia en el repetidor y ecualizadores de bloque regularmente espaciados a lo largo de la línea. Se consigue un ancho de banda de 16 a 18 nm (7 nm en el sistema 8x2,5 Gbit/s) que es suficiente para 16 cana-

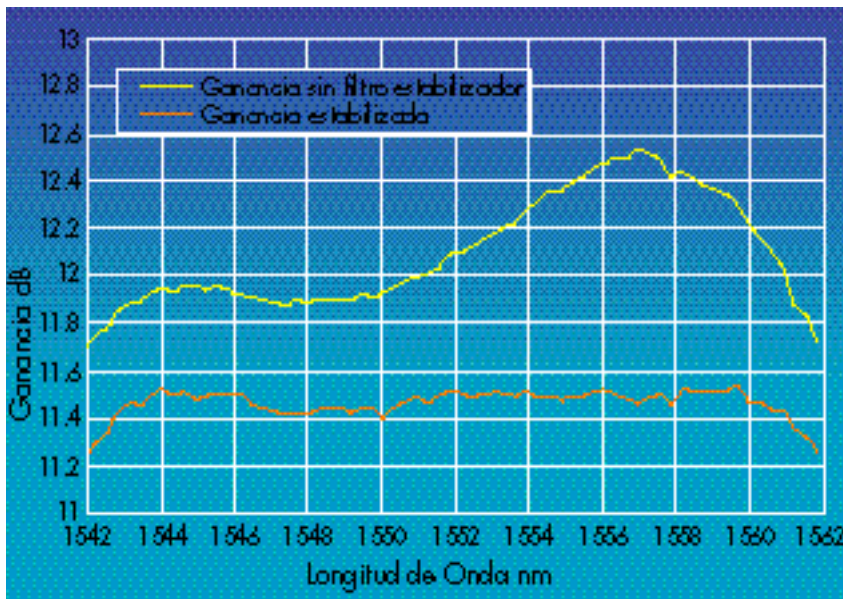


Figura 6 – Ancho de banda de un amplificador submarino con fibra de erbio co-dopada con aluminio.

les separados entre sí por 0,8 nm, y hace posible llegar a más de 20 longitudes de onda. La **Figura 6** muestra el ancho de banda de un amplificador que emplea fibra codopada con aluminio.

Para compensar la dispersión cromática de 16 canales espaciados 0,8 nm a lo largo de 9.000 km., empleando una fibra con dispersión 2 ps/nm/km. a la longitud de onda de 1560 nm, hay que insertar en el terminal hasta 480

km. de fibra sin dispersión. Esto supone una enorme cantidad de dinero, volumen y pérdidas. Quizás se podría evitar empleando retículas de Bragg. Estos dispositivos se han empleado satisfactoriamente para compensar la dispersión cromática en distancias de hasta 9.000 km. Además ofrecen la posibilidad de compensar la dispersión cromática positiva y negativa, obteniendo un mapa de dispersión cromática

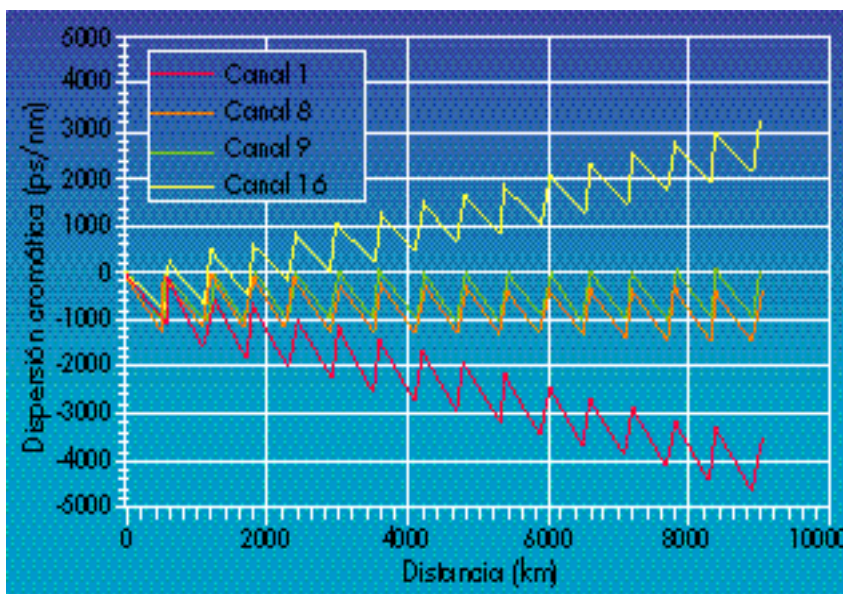


Figura 7 – Mapa de dispersión cromática simétrica.

simétrica, tal como aparece en la **Figura 7**.

■ ¿Cuál es la Solución para Redes Submarinas de Terabit?

Capacidad por longitud de onda

Transmisión por canal: 10 Gbit/s versus 5 Gbit/s

Las discusiones más recientes sobre sistemas submarinos de una capacidad global de 160 Gbit/s han suscitado dos cuestiones:

- La utilización de sistemas de 16 x 10 Gbit/s o de 32x5 Gbit/s, ambos con la misma capacidad total.
- Si la conexión a tierra de los sistemas se realizará en el futuro con 2,5 ó 10 Gbit/s.

Varios factores han llevado a Alcatel a elegir la solución de 16x10 Gbit/s, junto con el acceso a 10 Gbit/s.

Tal como aparece en la **Tabla 1**, los operadores de telecomunicación están iniciando un nuevo periodo de expansión debido al cambio del sistema STM-16/OC-48 al STM-64/OC-192. En el año 2000, cuando se desarrolle la primera red submarina de 160 Gbit/s, la inversión en el sistema terrestre de 10 Gbit/s será mayor que con la actual tecnología de 2,5 Gbit/s (12).

Otro aspecto interesante para comprender la situación actual es analizar la evolución del factor de granularidad submarino, que se define como el cociente entre la capacidad total transmitida por la fibra submarina y el flujo de acceso en la conexión entre la red terrestre y submarina. Este factor cuantifica el paralelismo entre la evolución de los equipos submarinos y las redes terrestres.

Debe decidirse para los sistemas submarinos de 160 Gbit/s si se empleará un factor de granulación igual, o si por el contrario se incrementará mucho este factor. Aunque la conexión del sistema submarino de 16x10 Gbit/s a la red terrestre sería a 10 Gbit/s (STM-64/OC-192), sin embargo, la utilizada para los sistemas de 32x5 Gbit/s seguiría siendo

	OC-48	OC-192
1998	328	212
1999	411	365
2000	420	465
2001	442	490
2002	457	505

Tabla 1- Previsión de inversiones en intercambiadores SONET (millones de dólares).

de 2,5 Gbit/s, ya que 5 Gbit/s no está estandarizado; este último llevaría a un factor de hasta 64, como muestra la **Figura 8**.

La elección de la tecnología 16x10 Gbit/s para los sistemas submarinos de 160 Gbit/s, combinada con la conexión de la red a los equipos terrestres empleando 10 Gbit/s, ofrece ventajas fundamentales:

- Continuidad con la evolución de los equipos terrestres: La elección de la misma tasa de transmisión entre los futuros sistemas terrestres y submarinos simplifica su acoplamiento (como puede verse en el ejemplo Gemini) y es una buena forma de construir una red global encargada de proporcionar servicios de alta calidad a sus usuarios finales.
- Facilidad de instalación y mantenimiento de las estaciones termina-

les: Un factor terrestre-submarino bajo evita la sobresaturación de las estaciones submarinas. Para la misma capacidad global, los sistemas submarinos de 16x10 Gbit/s necesitan la cuarta parte de equipo de SDH/SONET que los sistemas 32x5 Gbit/s. Esto lleva a un ahorro de espacio y de consumo eléctrico. Como la instalación y el mantenimiento son más fáciles, se producen ahorros significativos.

Esta evolución de las redes submarinas hacia la tecnología de 10 Gbit/s con una mayor capacidad, está orientada a proporcionar mejor servicio al usuario final creando una red global basada en un fuerte paralelismo entre los sistemas submarinos y terrestres.

Como consecuencia de estas razones, junto con la fortaleza de Alcatel en este campo, SND ha optado por el sistema 16x10 Gbit/s con acceso de 10 Gbit/s para el OALW 160, el producto para la red de 160 Gbit/s.

■ Familia de Productos OALW 64: Solución de 16x10 Gbit/s para red de 160 Gbit/s

La familia OALW 160 se ha diseñado para ofrecer a los clientes la máxima capacidad disponible para una red submarina. Este diseño optimiza la red terrestre y la submarina en su con-

junto. Se ha guardado especial atención al diseño de la línea, de forma que permita la transmisión transoceánica a 10 Gbit/s.

Descripción del sistema

El sistema OALW 160 ha heredado varias características y partes del diseño de la red del sistema OALW 16: el conducto del cable, el equipo de alimentación eléctrica, los sistemas de alojamiento del repetidor y de las unidades de ramificación, y el sistema de control de la red basado en el Alcatel 1353 SH.

El sistema 16x10 Gbit/s se ha diseñado para permitir futuras salidas compatibles con el sistema de conectividad, a partir de unidades de ramificación de inserción/extracción, como en el caso del OALW 16.

Sin embargo, el uso de conectividad WDM produce dos restricciones al sistema WDM:

- Degradación de la SNR (Signal to Noise Ratio) en el tronco, ya que es altamente complicado sumar una longitud de onda en una unidad de ramificación WDM en su nivel de cresta ideal.
- Es difícil distinguir con seguridad con un filtro entre dos canales de 10 Gbit/s con una separación de longitudes de onda de solamente 0,8 nm y que han atravesado miles de kilómetros de red.

Debido a estas restricciones, no se prevé la conectividad WDM para las primeras implantaciones del sistema OALW 160.

El desarrollo de este producto pasa por dos etapas técnicas. La **Figura 9** muestra el espaciado de los repetidores en función de la longitud del sistema para diferentes capacidades y las diferentes etapas.

La primera etapa utiliza plantas submarinas diseñadas para operar con 16x2,5 Gbit/s, utilizando amplificadores de 1480 nm y fibra de 50 μm . En esta etapa, se emplean totalmente desarrolladas para construir wet plants capaces de operar con 16x10 Gbit/s en distancias de hasta 4.000 km.

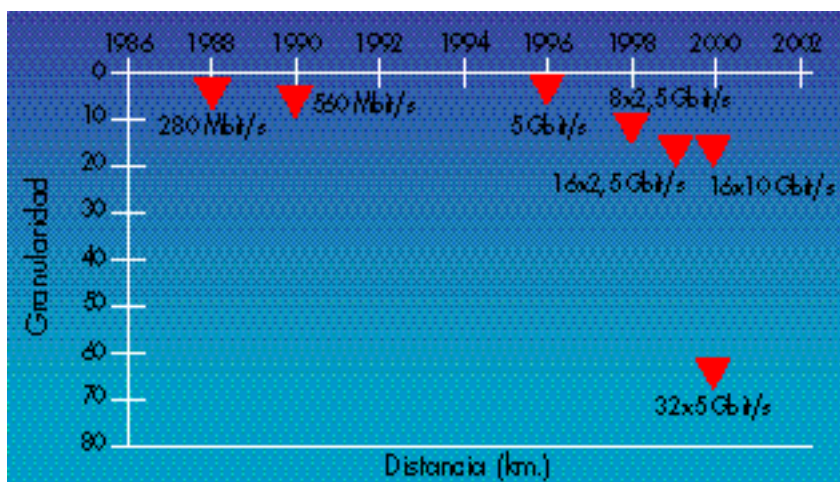


Figura 8 – Evolución del factor de granularidad terrestre-submarina.

La segunda etapa es un sistema de 16x10 Gbit/s diseñado para distancias por encima de 7.500 km. Por lo que son necesarias fibras de gran sección efectiva. La construcción de la wet plant comenzará a principios de 1999, el primer sistema estará listo para su utilización a mediados del año 2000.

En el futuro se podría aumentar el número de longitudes de onda y realizar una protección tributaria de nueva tecnología.

Red

Protección de la red

En las redes de 16x10 Gbit/s pueden emplearse una gran variedad de mecanismos de protección.

En las topologías de anillo, que suelen ser las más frecuentes, se puede llevar a cabo la protección a nivel de camino (SNC-P) o a nivel de sección (MS-SPRing), y finalmente en el modo NPE. Tanto el SNC-P como el NPE garantizan que, en caso de fallo de la red, se utilizará la ruta óptima. La principal ventaja del sistema SNC-P es su corto tiempo de recuperación (50 ms), mientras que el NPE permite transportar tráfico extra fuera del ancho de banda de protección.

En una red fabricada de anillos interconectados, se puede realizar un

mecanismo extraer y continuar para permitir el tráfico en estas situaciones.

En las configuraciones punto-a-punto se puede proteger la línea con los modos 1+1 ó 1:1.

Por último, pero no menos importante, las redes basadas en una malla digital pueden protegerse mediante un mecanismo de restauración que optimice el uso del ancho de banda a expensas de un mayor tiempo de recuperación.

Elementos de las redes de 10 Gbit/s

Alcatel propone dos dispositivos para su uso en redes de 10 Gbit/s:

- Multiplexor de inserción/extracción Alcatel 1674 ESM: Está dotado con cuatro tarjetas integradoras STM-64 y una amplia gama de tarjetas tributarias, ofreciendo accesos protegidos 1+1 STM-1, STM-4 y STM-16. Este equipo es compacto y posee una buena relación de efectividad-coste, por lo que se utiliza en muchas configuraciones de red.
- Transconector digital de Alcatel: consta de una gran malla de hasta 1280 STM-1, con posibles accesos a nivel de 140 Mbit/s, STM-1, STM-4 y STM-16. En el caso de que los operadores de telecomunicación

quisieran controlar el tráfico de menor granularidad (2, 34 ó 45 Mbit/s), Alcatel les ofrece otros productos adecuados a sus necesidades.

Diseño de la línea

El diseño de la línea de 16x10 Gbit/s es un aspecto clave del sistema OALW 160. SND ha llevado a cabo experimentos preliminares para las siguientes capacidades: funcionamiento de una red de transmisión experimental de 8x10 Gbit/s para un recorrido de 6.000 km. y de un sistema de 16x10 Gbit/s en un experimento a bucle cerrado de 7.000 km. El funcionamiento de este último aparece reflejado en la **Figura 9**. Para los 6.000 km. se obtuvo un factor Q de aproximadamente 16 dB, mientras que el sistema de 8x2,5 Gbit/s consiguió un factor Q de 19 dB para la misma distancia.

Esta gran diferencia de funcionamiento es debida a tres factores principales:

- La máxima potencia de salida por canal para 6.000 km es de aproximadamente 1.5 dB, mientras que para un sistema basado en canales de 2,5 Gbit/s es de unos 0 dB por canal.
- Aumento del ancho de banda debido al aumento del flujo de bits (6 dB).
- Aumento de la degradación debido a los efectos de propagación.

El funcionamiento de estos experimentos no ha logrado el nivel requerido para conseguir una compatibilidad total con las instalaciones industriales para distancias transoceánicas. Normalmente se necesita un margen de más de 5 dB entre el experimento y el factor de Q requerido, pues en la realidad se producen numerosos desajustes de la transmisión en la construcción, reparaciones o debido al envejecimiento, y hay que alcanzar el margen de error estipulado (normalmente de 10-13).

Para obtener este margen necesario de error se pueden utilizar tres medidas en el diseño de la red:

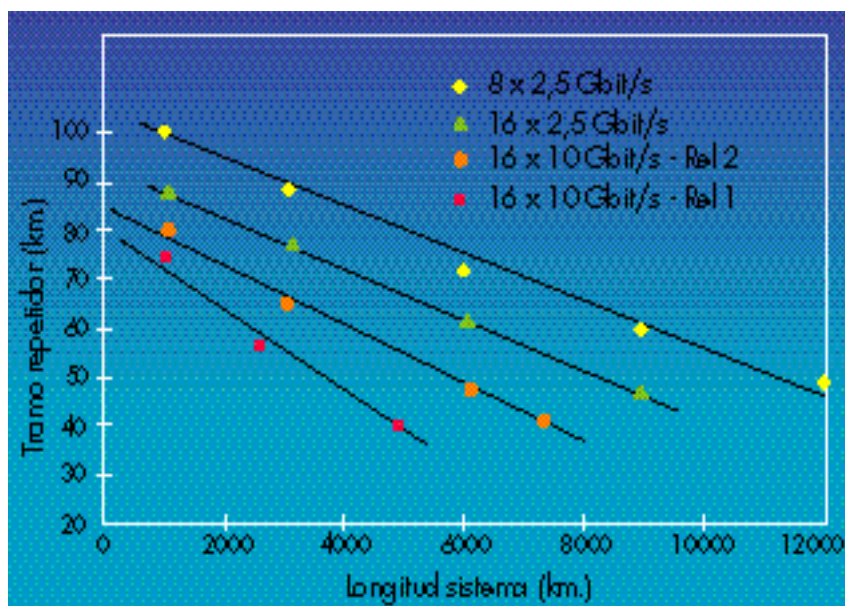


Figura 9 – Espaciado de los repetidores para distintas capacidades.

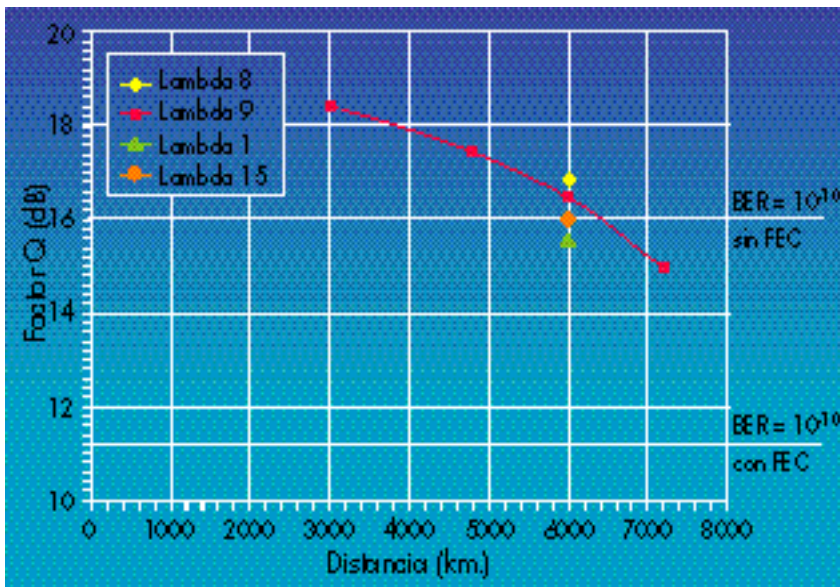


Figura 10 – Resultados del experimento de bucle cerrado para 16x10 Gbit/s.

- La realización de pumping en 980 nm reduce el ruido del amplificador en 1 dB y aumenta el factor Q en la misma cantidad.
- La fibra de 80 μm^2 permitirá aumentar la potencia de salida óptima aproximadamente 2 dB, siempre que pueda limitarse el efecto de cableado.
- El procesamiento FEC (Forward Error Correction) mejorado permite obtener unas relaciones de error por debajo de 10-13 para un SNR inferior a 9.5 dB, lo que corresponde a una mejora de 2 dB comparada con el FEC actual.

Hoy en día, la utilización de modulación RZ (Return to Zero) en el transmisor se considera la mejor manera para minimizar los efectos adversos de la dispersión cromática. Todavía es un problema el control de la propagación a lo largo de distancias transoceánicas, su comprensión plena se producirá seguramente en el futuro inmediato.

Algunos suministradores han experimentado con sistemas de 5 Gbit/s y los ofrecen argumentando que esta capacidad se puede obtener incrementando los márgenes. Ya hemos mostrado que esta solución es demasiado ineficiente a nivel de red para considerarla aceptable. Además el FEC me-

jorado elimina los últimos límites conocidos de la transmisión a 10 Gbit/s.

■ Conclusión

La familia de productos WDM de la SND está entrando actualmente en su tercera generación. La gama de productos de 16x2,5 Gbit/s es una evolución menor del sistema actual OALW 16 que ofrece un aumento de capacidad a un precio muy competitivo y en un corto espacio de tiempo. Este nuevo sistema se instalará en Southern Cross.

Continuando el éxito del sistema OALW 16 basado en 8x2,5 Gbit/s y su extensión a 16x2,5 Gbit/s, SND está lanzando un sistema de 16x10 Gbit/s, conocido como OALW 160. La nueva gama de productos 16x10 Gbit/s se está diseñando con la más moderna tecnología. Ofrecerá la máxima capacidad para redes transatlánticas y transpacíficas. Aunque está basada en tecnologías de transmisión relativamente estándar (modulación RZ, FEC, etc.), cumplirá con los niveles de funcionalidad, disponibilidad y características de la red, minimizando, al mismo tiempo, el tamaño de los equipos y los costes de la familia completa de productos OALW 160 asociada con el equipo SDH terrestre. Esta solución ya se ha propuesto para la red

transatlántica TAT 14 y para la red de conexión entre Japón y USA.

■ Referencias

- 1 O. Gautheron y otros: "82,5 Gbit/s WDM Transmission over 6.000 km with Wavelength Add-and-Drop Multiplexing", Electronic Letters, volumen 32, número11, 1996, pág. 1019.
- 2 O. Gautheron y otros: "Robustness of WDM Submarine Transmission to Degraded Conditions", OFC' 97, Dallas, EE.UU.
- 3 L. Prigent y otros: "82,5 Gbit/s WDM Transmission in a Transoceanic Network", NOC96, Heidelberg, Alemania, 1996.
- 4 L. Le Gourriérec y otros: "Branching Unit Concept for WDM Connectivity", Suboptic '97, San Francisco, EE.UU.
- 5 C.D. Stark y otros: "Line Terminal Equipment Considerations for Long Haul WDM Transmission", Suboptic '97, San Francisco, EE.UU.
- 6 N.J. Hazell y otros: "Design considerations for optimised multi-wavelength undersea repeaters", Suboptic '97, San Francisco, EE.UU.
- 7 V. Lemaire y otros: "The Alcatel Solution for Emerging WDM Submarine Networks: Architecture and Design", Suboptic '97, San Francisco, EE.UU.
- 8 C. De Maindreville y otros: "Submarine Network Management: Architectural Issues", Suboptic '97 San Francisco, EE.UU.
- 9 J.F. Libert y otros: "A New Undersea Cable for the New Millenium", Suboptic '97, San Francisco, EE.UU.
- 10 S. Hill y otros: "A Flexible Power Feeding System for Subsea Cable Network", Suboptic '97, San Francisco, EE.UU.
- 11 B. Le Mouél y otros: "From Point-to-Point Links to Networks Bene-

fits to Customers and Technical Solutions”, SubOptic’97.

12 The Insight Research Corporation, “Telecom Backbone Networking”, Parsippany, NJ, EE.UU., 1997.

13 J. Chesnoy y otros: “WDM Submarine Networking”, Alcatel Telecommunications Review, 1er trimestre 1997, págs. 63-68.

J. Chesnoy es Director de Desarrollo de Redes y Sistemas en Redes Submarinas de Alcatel, Nozay, Francia.

O. Gautheron es responsable del diseño de los productos de las gamas que van de OALW 16 a OALW 160.

L. Le Gourriérec está a cargo del diseño de la arquitectura de la Red Submarina. Es en la actualidad Director del Proyecto de Red de Southern Cross.

V. Lemaire es Director del Equipo de Diseño de Sistemas, dentro de la División de Sistemas Submarinos, Nozay, Francia.

FABRICACIÓN DE LÁSERES PARA APLICACIONES DWDM

G. MESQUIDA
C. OGUEY

La revolución aportada por la técnica DWDM en los sistemas de telecomunicaciones sobre fibra no habría tenido lugar sin disponer de los láseres apropiados.

■ Introducción

El campo de las comunicaciones sobre fibra óptica ha conocido una serie de revoluciones tecnológicas en diferentes oleadas.

Después de la ya lejana del comienzo de la fibra de silicio en las ventanas de 1.300 a 1.500 nm para transmitir a grandes y muy grandes distancias; tras aquella de las fuentes láser de buenas prestaciones, fiables, y de coste razonable y, finalmente, de la más reciente de los amplificadores ópticos de fibra dopada en las redes de transmisión, hoy ya se pueden apreciar las primeras consecuencias de la revolución del DWDM (multiplexación densa por división de longitud de onda).

Su impacto será aún ciertamente más grande, ya que esta técnica, lanzada hace dos años, se basa a su vez en tres importantes características de las tecnologías básicas puestas en marcha en las revoluciones antes mencionadas:

- el formidable ancho de banda (varios teraherzios) de la fibra óptica, poco utilizado hasta entonces,
- la capacidad de los diodos láser para emitir a una longitud de onda precisa, estable y con un ancho espectral muy reducido,
- la transparencia de los amplificadores de fibra a la velocidad de línea y su propiedad de amplificar uniformemente varios canales a la vez.

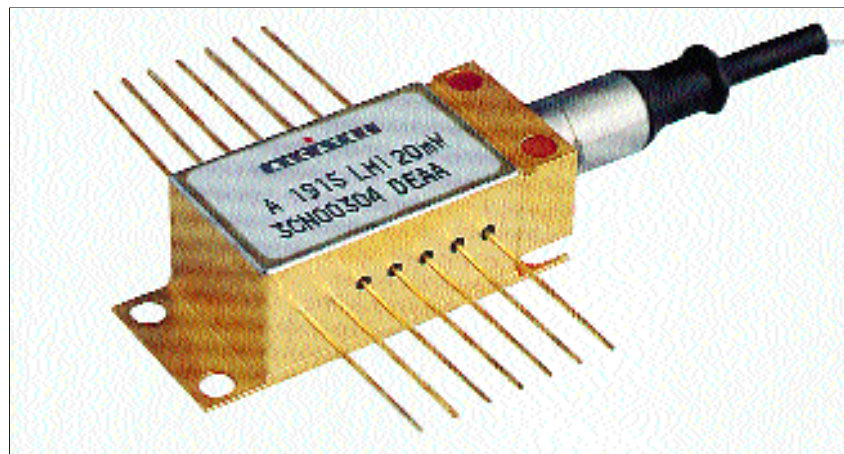
■ Conceptos Básicos de la Técnica WDM

La técnica WDM surgió de la idea de inyectar simultáneamente en la misma fibra varios trenes de señales digitales a la misma velocidad de modulación, pero con una longitud de onda diferente. Así se multiplexan en transmisión n canales a una velocidad nominal D , y se demultiplexa en recepción la señal global a una velocidad $n \times D$ en n canales nominales. La multiplexación/demultiplexación es frecuencial y se basa en la asociación de cada canal con una longitud de onda precisa en transmisión.

Una norma de la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) define una serie de longitudes de onda autorizadas en la ventana de transmisión entre 1528 y 1565 nm, y sólo en

esta ventana. Se normaliza también el espaciado en nanómetros o en gigaherzios entre dos longitudes de onda: 200 GHz ó 1,6 nm, 100 GHz ó 0,8 nm, etc. Se dice que esta técnica es “densa” porque el espaciado utilizado es igual o inferior a 100 GHz.

Es en las redes de transmisión a gran distancia donde los sistemas de transmisión con multiplexación de longitud de onda (WDM) ha comenzado a probar todo su interés, en particular en sistemas de transmisión de alta velocidad a 2,5 Gbit/s. Esta técnica permite aumentar la capacidad global de transmisión de la fibra instalada conservando la infraestructura existente. Se transmiten 4, 8, 16 ó 32 señales a 2,5 Gbit/s por la misma fibra, aumentando la velocidad nominal de la línea a 10, 20, 40 ó, incluso, 80 Gbit/s.



A1915 LMI: Módulo láser DWDM de alta velocidad.

El límite de proceso está ligado al posible número de fuentes de longitud de onda controladas en la ventana de transmisión.

Componentes básicos de estos sistemas

Las fuentes ópticas de transmisión como las cabezas ópticas de láser y los amplificadores ópticos se consideran los principales componentes de los sistemas de transmisión:

- Una gama de diodos láser de longitudes de onda precisas y controladas. Cada sistema funciona con sus propias especificaciones de longitud de onda, que se corresponden con un parte del total. El reto a vencer para disponer de estos componentes es de naturaleza tecnológica (dominio del diodo láser y de su fabricación, estabilidad temporal y térmica en longitud de onda, dominio de la fabricación de la cabeza óptica y de su efecto sobre las características del diodo láser), e industrial (fabricación y gestión de las diferentes nomenclaturas para cada longitud de onda, coste, aprovisionamiento, tiempos del ciclo de fabricación y tiempo de entrega). Estos módulos láser pueden modularse directamente a 2,5 Gbit/s -es

el caso del Alcatel 1915 LMI de Alcatel Optronics- o emitir en continuo conjuntamente con un modulador óptico externo (por ejemplo, Alcatel 1905 LMI).

- Una familia de amplificadores con fibra dopada que permite compensar las pérdidas de inserción debidas a la multiplexación/demultiplexación y aumentar las longitudes de transmisión, suprimiendo las estaciones repetidoras. La arquitectura de los amplificadores tiene la ventaja de presentar una ganancia plana en una gran banda de longitudes de onda. De hecho, los 8, 16, 32, etc., canales paralelos se amplifican de igual manera en cada estación amplificadora de línea, lo que hace que haya una calidad uniforme en toda la transmisión. Estos amplificadores WDM forman parte de la familia Alcatel 1920 OFA.

La **Figura 1** muestra un esquema típico donde se ilustra la utilización de estos componentes en la red.

Los componentes menos críticos como las cabezas ópticas de recepción, o los componentes pasivos cuya fabricación y control son delicados (multiplexores y demultiplexores) no son objeto de un desarrollo especial en este artículo.

■ El Auge de WDM

En el espacio de unos pocos años, la técnica DWDM ha pasado del estado de curiosidad de laboratorio al de un deseo real expresado por la mayor parte de los operadores de larga distancia americanos.

Esta apertura es el resultado de una concatenación de diferentes elementos. En primer lugar, hay un fuerte impulso del mercado en forma de una demanda insaciable de ancho de banda, debido al creciente fenómeno de Internet, lo que no se esperaban la mayor parte de los observadores industriales. Además, el crecimiento del deseo de comunicación de las empresas, asociado a una demanda siempre mayor de redes de gran fiabilidad, ha llevado a algunos operadores a considerar, cada vez con más atención, las redes de anillo del tipo SONET/SDH (Synchronous Optical NET work/Synchronous Digital Hierarchy), altamente fiables y seguras, que son también particularmente ansiosas de ancho de banda.

También, jugando con el hecho de que es aún demasiado cara -y a veces imposible- la simple instalación de un nuevo cable de fibra óptica, el uso del DWDM en los sistemas punto-a-punto se ha revelado como una alternativa particularmente eficaz y económica por la creciente capacidad que ofrece

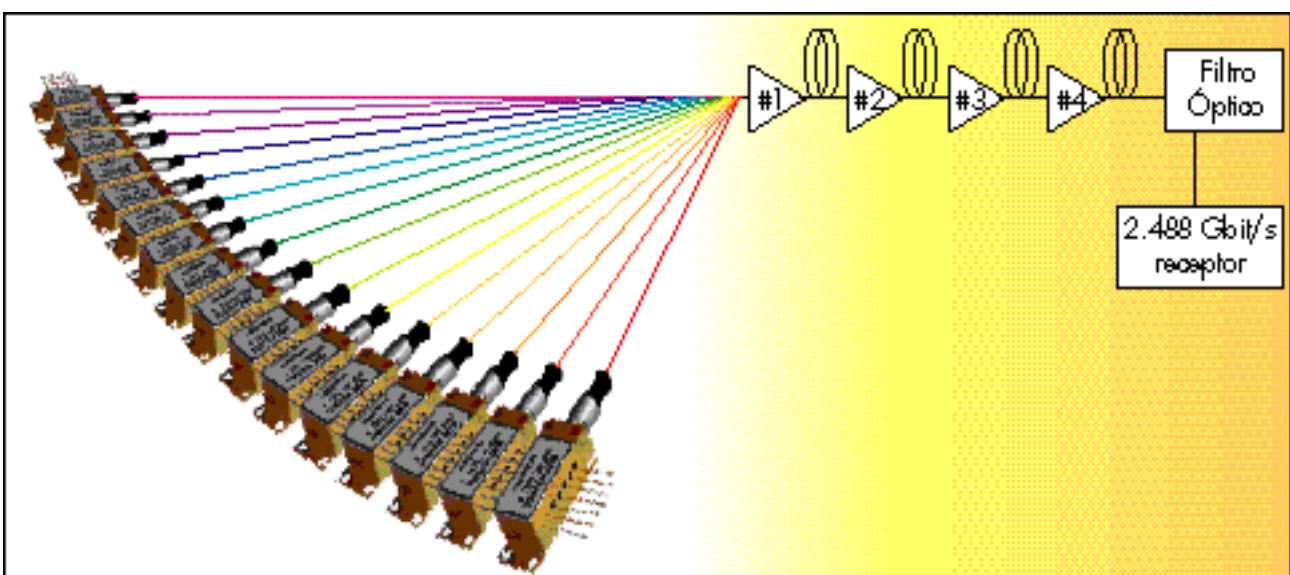


Figura 1 - Utilización de componentes WDM en una línea de transmisión.

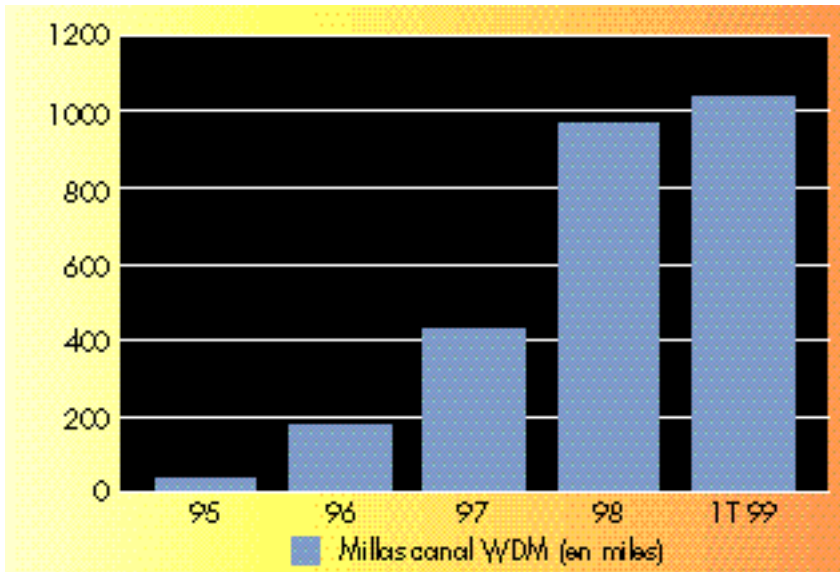


Figura 2 - Millas de fibra instalada utilizando WDM en Estados Unidos.

al utilizar la fibra ya instalada. Por último, es evidente el hecho de que esta técnica goza de una popularidad cada vez mayor entre los usuarios.

Redes de larga distancia en transmisión punto-a-punto

Se trata de la aplicación más desarrollada ya que, desde 1995, las redes de

larga distancia de fibra óptica instaladas en los Estados Unidos, a lo largo de la última década, han conocido dos cambios importantes en su infraestructura técnica: el despliegue de la norma SONET y la emergencia de la tecnología WDM.

Desde hace tres años, la penetración de la WDM en la red de larga distancia de Estados Unidos no ha parado

de crecer, como se muestra en el esquema de la **Figura 2**: la cantidad de millas instaladas en WDM no hace sino doblarse cada año, con unas previsiones para el primer trimestre de 1999 similares al total de 1998.

El diagrama típico de un sistema DWDM desplegado en una configuración punto-a-punto entre los elementos de la red SONET a OC-48 (norma SONET para 2,5 Gbit/s) muestra claramente la asignación funcional de ciertos canales para proteger la red (**Figura 3**).

Redes locales y metropolitanas

Internet cuenta en la actualidad con más de cien millones de usuarios en todo el mundo, accediendo a 1,6 millones de nodos. Cada vez más, el deseo de ancho de banda afecta a las redes de acceso secundarias y, en particular, a las redes metropolitanas. El esquema, que consiste en transmitir a 2,5 Gbit/s entre los nodos de estas redes locales y, en ciertos casos, desplegar OC-48 hasta las empresas y centros de negocios, es cada día más evidente. La **Figura 4** muestra estas nuevas arquitecturas.

Redes de cables submarinos

La técnica WDM aporta de forma incontestable dos importantes mejoras a las redes submarinas de fibra óptica: el crecimiento de la capacidad gracias a una instalación fácil y flexible de las longitudes de onda suplementarias en los terminales terrestres y, por otro lado, una mayor facilidad de funcionamiento de la red, gracias a la capacidad de encaminamiento de las diferentes longitudes de onda utilizadas por esta técnica. Así, en las unidades repetidoras sumergidas, se puede ajustar y regular el tráfico de información transmitido, efectuar operaciones de inserción/extracción de las longitudes de onda, y reconfigurar las arquitecturas ya instaladas.

Estas redes internacionales, en pleno y rápido desarrollo, constituyen en la actualidad los mejores ejemplos para los sistemas WDM más evolucionados. No es extraño oír hablar de la

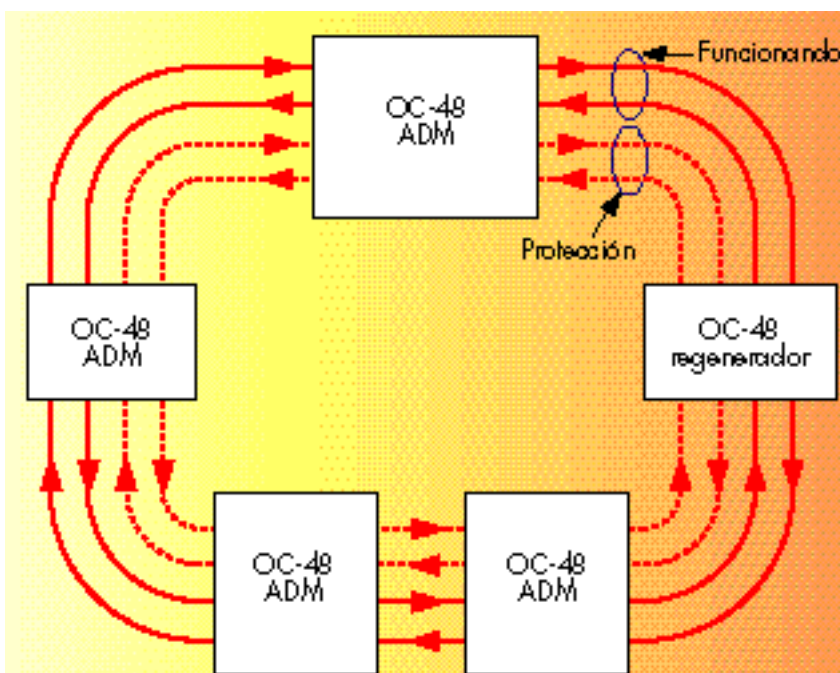


Figura 3 - Diagrama típico de un anillo SONET a 2,5 Gbit/s.

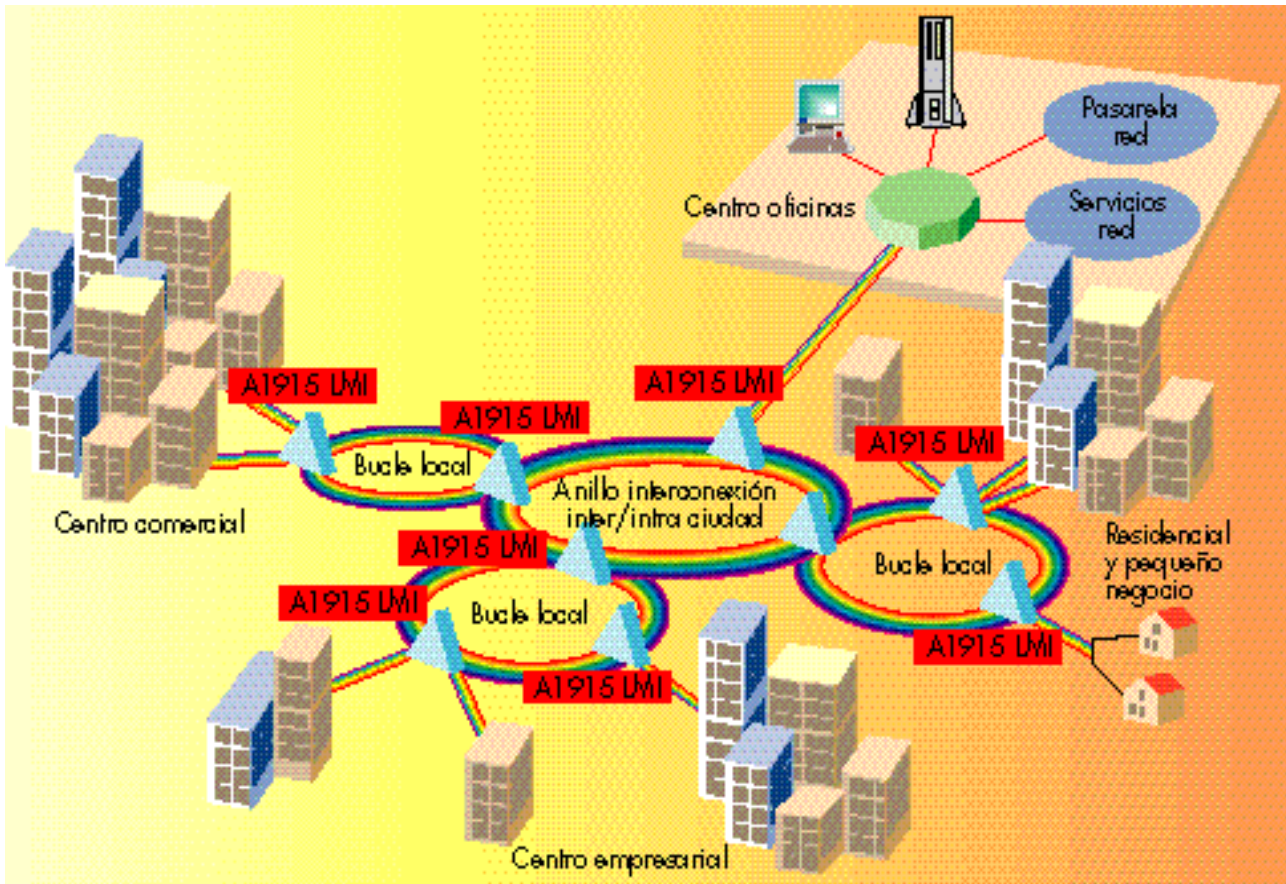


Figura 4 - Penetración del WDM en las redes metropolitanas.

factibilidad en el laboratorio de sistemas DWDM de cuatro fibras que muestran una capacidad de más de 500 Gbit/s sobre miles de kilómetros.

■ Tecnologías Claves

El principal reto de un fabricante de fuentes de emisión láser, en un campo tan evolutivo como el de WDM, es realizar las apuestas industriales pertinentes. Para ello, Alcatel Optronics se basó, en un principio, en el análisis detallado de los deseos expuestos por los clientes. Este análisis se basa en los dos principales requisitos del sistema:

- la emisión continua asociada a una modulación externa,
- la modulación directa del componente.

Estos requisitos pueden ser de nuevo segmentados en la respuesta que Alca-

tel Optronics quiere aportar a los deseos específicos de aplicación de sus clientes y para minimizar las limitaciones debidas a la multiplexación de longitud de onda.

Un análisis global de esta segmentación ha llevado naturalmente a Alcatel Optronics hacia una estrategia de producción basada en una filosofía de

procesos funcionales tecnológicos, que ya ha dado sus frutos durante la industrialización de los diodos láser BRS (estructura láser de cinta enterrada).

La traducción de este método ha llevado a satisfacer las especificaciones y limitaciones asociadas con la alta velocidad y la multiplexación de la longitud de onda utilizando un chip de

Modulación Externa	Modulación Interna
Funcionamiento continuo del láser	Modulación directa
Fibra con polarización constante	Velocidad de 2,5 Gbit/s
Posibilidad de fuerte potencia	Débil chirp (aumento de la línea espectral en modulación)
Ajuste de longitud de onda (para cubrir especificaciones de cliente)	Espectro modulado

Tabla 1 - Características requeridas para cumplir los requisitos de los sistemas WDM.

Aplicaciones	Multiplexación en longitud de onda
CW (corriente continua) y/o 2,5 Gbit/s	Cobertura completa de la ventana de 1550 nm
Potencia débil o fuerte	Espaciado (100/50 GHz)
Tipos de fibra	Orientada a sistema
Férula o conectores	Fiabilidad

Tabla 2 - Análisis de la demanda del mercado.

láser genérico –base indispensable en las prestaciones del producto– y a responder a la especificidad de las aplicaciones buscadas mediante una arquitectura de módulo láser genérica.

Esta filosofía se puede resumir en las **Tablas 1 y 2**.

Los límites de este método están relacionados con la necesidad de ajuste de las longitudes de onda de los módulos láser.

En este caso, un método de procesos funcionales tecnológicos permite responder a la demanda de multiplexación de longitud de onda. Este método se construye sobre la base de:

- Un diodo láser genérico optimizado por ajuste longitud de onda y modulación a alta velocidad.
- Una cabeza óptica genérica para disponer de una total flexibilidad, necesaria en las aplicaciones de los clientes.

■ Fabricación de Diodos Láser

El dominio de la producción del láser es una de las claves del éxito para un fabricante que pretenda jugar un papel preponderante en la DWDM. Alca-

tel Optronics ha sabido capitalizar los trabajos y los avances logrados en los cuatro últimos años gracias a la unión de sus equipos de desarrollo industrial y a los importantes éxitos de los equipos de investigación del CRC (Centro de Investigación Corporativo). Uno de los frutos concretos de estos programas es un láser construido sobre la estructura BRS (**Figura 5**) a partir de un sustrato de fosforo de indio (InP).

Esta estructura, cuya facilidad de producción es una ventaja decisiva, ha permitido desarrollar un procedimiento de fabricación muy homogéneo sobre obleas de dos pulgadas (5,14 cm.) de diámetro. Este procedimiento reúne excelentes prestaciones y fuertes rendimientos globales, lo que lleva a la obtención de una tasa elevada de éxito de los láseres en cada oblea.

El sencillo procedimiento de fabricación elegido para realizar esta estructura láser, junto al domino estadístico de los procedimientos (MSP), garantiza unos rendimientos elevados y permiten predecir con gran precisión la distribución de la longitud de ondas en estos láseres. La longitud de onda de los láseres está fijada por la red de la estructura DFB (realimentación distribuida) **La Figura 6** muestra la distribución de longitud de onda de los láseres obtenidos en veinte obleas consecutivas.

Esta distribución se mide en relación con la banda atenuada de la oblea, valor de la longitud de onda tecnológica que permite regular la ganancia de red grabada en el chip láser.

A ambos lados de la banda atenuada se obtiene una longitud de onda que sigue un reparto bimodal con cerca del 42% de su población por debajo y el 58% por arriba del valor buscado. Este resultado práctico está en perfecta correspondencia con las distribuciones calculadas. Los dos grupos de láseres no presentan ninguna diferencia de comportamiento tanto en el ámbito de las características ópticas como del envejecimiento.

Se pueden obtener láseres de longitud de onda intermedia ajustando ligeramente la temperatura de funcionamiento de los láseres del grupo 1 de 25°C a 35°C (tasa de variación de la longitud de onda de 0,1 nm/°C).

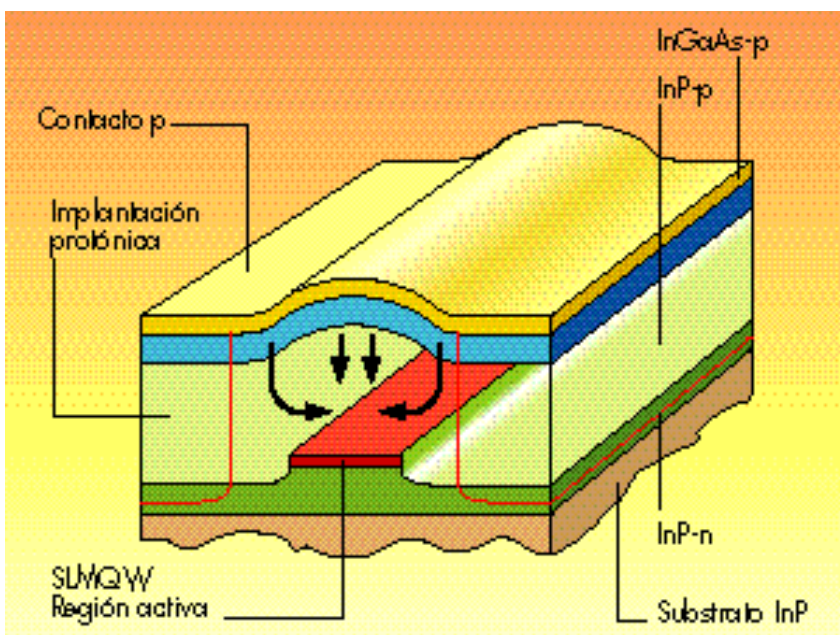


Figura 5 - Láser de cinta enterrada (BRS).

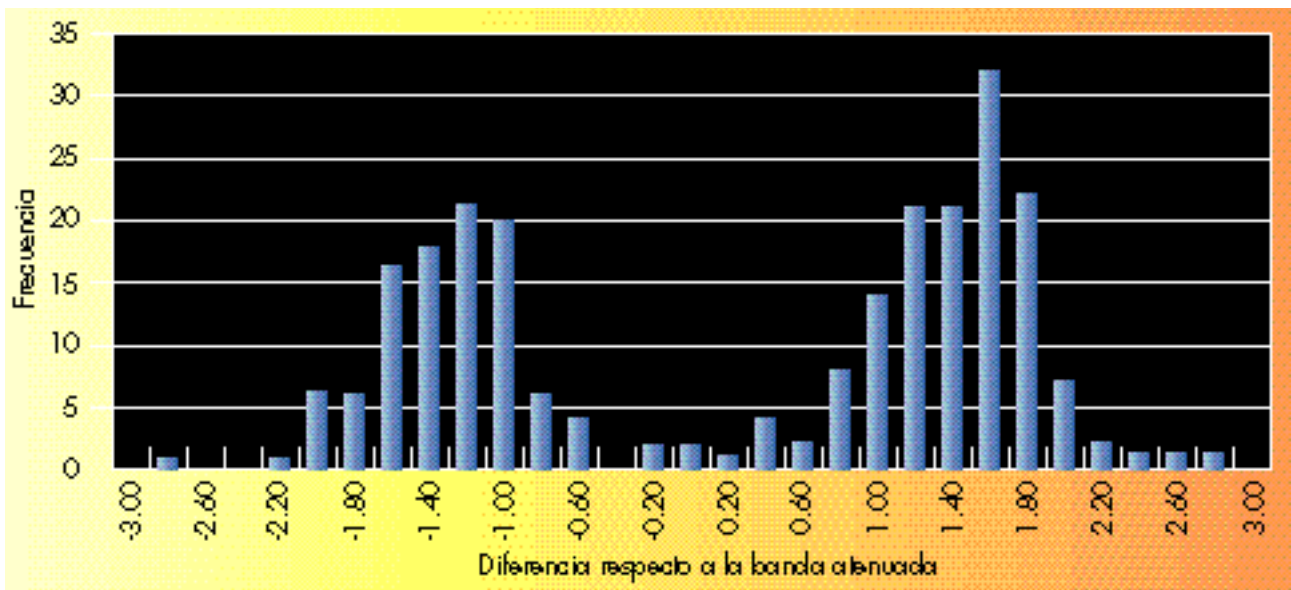


Figura 6 - Distribución de la longitud de onda en 20 obleas referenciadas con respecto a la banda atenuada.

Este método permite asegurar una total cobertura de la longitud de onda entre 1528 nm y 1565 nm, gracias a este ajuste de temperatura y a un buen recubrimiento de todas las obleas. Todas las pruebas practicadas muestran que esta ligera diferencia de temperatura no afecta ni al comportamiento dinámico ni a la fiabilidad del láser.

Cada oblea se trata con una etapa de red DBF bien determinada para asegurar una diferencia de la longitud de onda de Bragg de unos -20 nm res-

pecto al pico principal de ganancia. La elección de este valor se corresponde con un muy buen compromiso entre las altas prestaciones a gran velocidad y un buen rendimiento DBF en el margen de temperatura considerado.

La retícula de la red se calcula utilizando la fórmula lineal:

$$\text{banda atenuada} = 2 n_{\text{eff}} X \text{ retícula}$$

La **Figura 7** muestra que este cálculo permite obtener la longitud de onda de

la placa a 1 nm del valor previsto. Gracias al seguimiento estadístico de los resultados de fabricación y a un mejor control del índice efectivo n_{eff} , se han aportado mejoras que permiten obtener la longitud de onda deseada en la fabricación de la oblea con una precisión de 0,3 nm a 25°C.

■ Estabilidad de Longitud de Onda, un Factor Crucial

Además de la limitación de ajuste de longitud de onda, los sistemas DWDM tienen que garantizar la estabilidad de esta longitud de onda durante todo su funcionamiento. Para verificar esto se han realizado numerosas pruebas de envejecimiento con láseres de diferentes obleas, que cubrían toda la gama de longitudes de onda del dominio espectral.

Para aportar a los clientes las respuestas deseadas se han efectuado dos tipos de pruebas, la primera con corriente constante y la segunda con potencia constante (supervisión en la parte trasera). Hay que hacer notar que las pruebas de potencia constante amplifican ligeramente la deriva aparente de la longitud de onda de los láseres.

La **Figura 8** permite ilustrar la deriva medida a 40°C de láseres sometidos a una prueba a 100°C y 200 mA, du-

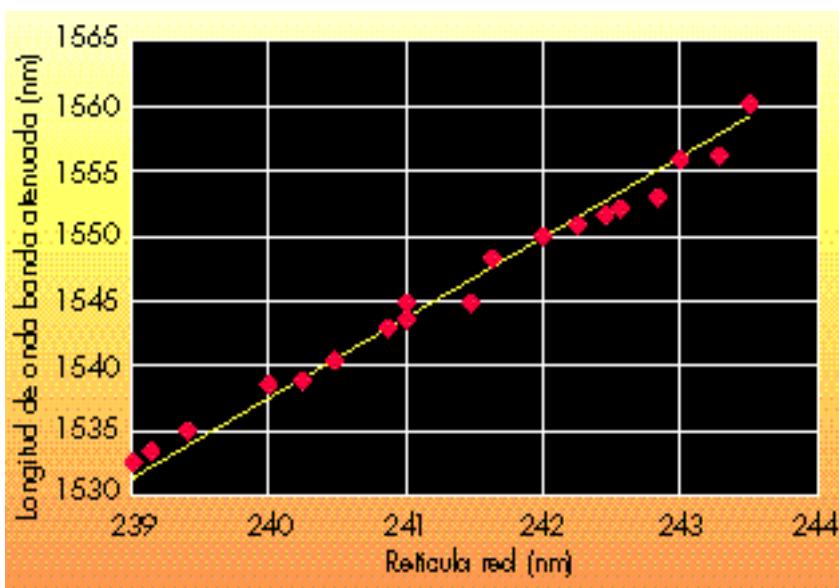


Figura 7 - Reparto de la longitud de onda en función del grating DBF.

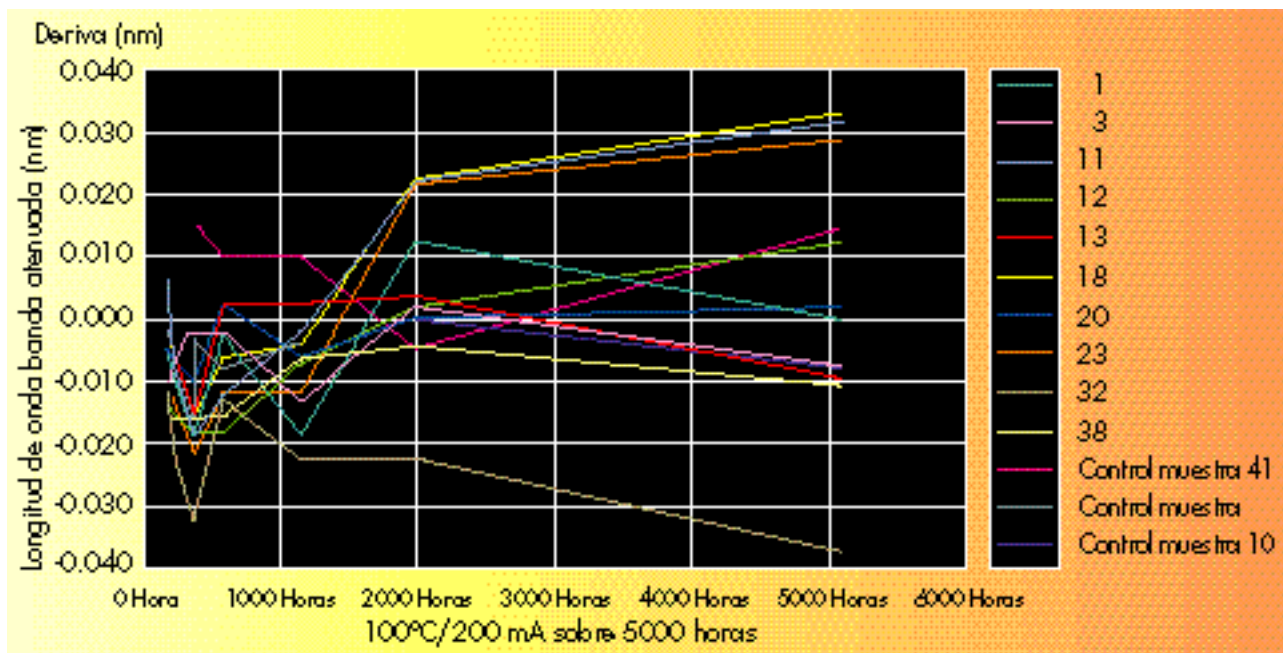


Figura 8 - Evolución de la longitud de onda a 40°C durante las pruebas de gran duración.

Tipo de prueba	Duración en horas	Cambio de la longitud de onda
53°C / 4 mW	8.000	< 0,04 nm
53°C / 8mW	7.000	< 0,06 nm
80°C / 4 mW	5.500	< 0,02 nm

Tabla 3 - Resultados de las pruebas de potencia constante.

rante 5.000 horas de funcionamiento. Las diferencias, aunque poco fluctuantes, se deben esencialmente a las imprecisiones de las medidas.

La **Tabla 3** reúne los resultados obtenidos en numerosas pruebas de potencia constante.

En todos los casos, los resultados permiten garantizar una deriva de la longitud de onda que no supera nunca los 0,02 nm/año a la temperatura de funcionamiento.

■ Tecnologías de Montaje

Al igual que para el diodo láser, el método industrial de crear procesos funcionales tecnológicos elementales, ya perfectamente dominado, ha sido re-

conducido para el montaje de los módulos. Se han considerado tres grandes apartados:

- acoplamiento de doble óptica discreta que permite la inserción de un aislante,
- apilamiento de las diferentes piezas por abrasamiento sin flujo,
- ensamblado de las diferentes partes ópticas usando soldadura con láser YAG.

La realización del módulo sigue las tres grandes etapas siguientes:

- Primero, se coloca la óptica que permite focalizar el haz del láser. Se fija por soldadura YAG con la ayuda de las piezas mecánicas adecuadas,

una de las cuales sirve también de soporte del láser y del fotodetector de supervisión (**Figura 9**).

- El apilado (**Figura 10**) es la siguiente etapa y consiste en apilar y fijar por abrasamiento sin flujo el termoelemento refrigerador y el conjunto láser/fotodetector y la primera lente en la cápsula. A esto le sigue el cerramiento hermético por soldadura YAG.
- La última etapa, consiste en colocar frente al encapsulado (equipado con una ventana transparente a la longitud de onda de funcionamiento) la segunda lente y el aislante óptico, así como la fibra (**Figura 11**). Esta es la etapa más compleja ya que necesita varios controles x-y (para la segunda lente y el aislante), x-y-z para la fibra e, incluso, uno angular si se trata de una fibra que mantiene la polarización. Esta etapa permanece sin embargo perfectamente controlada y nos permite además ajustar muy precisamente la potencia de acoplamiento apropiada.

La soldadura YAG pone todos estos diferentes módulos solidarios en la cápsula.

Tras estas etapas de montaje, el módulo sufre una serie de pruebas electroópticas y otras que permitan garantizar la estabilidad del acoplamiento,

así como sus prestaciones ópticas. Al final, estas pruebas se complementarán por una medida de la tasa de error, con y sin fibra, de dispersión cromática (200 km.), para garantizar la capacidad de funcionamiento del módulo a 2,5 Gbit/s.

En la actualidad, esta familia de módulos satisface los numerosos deseos de los clientes en una amplia gama de niveles de potencias acopladas. La **Tabla 4** muestra un resumen de esta cobertura para diferentes aplicaciones.

Todos estos productos se han sometido a pruebas de cualificación que responden a la norma Bellcore TR-NWT-000468 (para aplicaciones de interior/exterior). Las diferentes pruebas realizadas permiten garantizar una tasa de fallos inferior a 200FITs

Aplicación	Potencia acoplada disponible
Modulación directa a 2,5 Gbit/s	de 4 mW a 10 mW
Modulación externa con polarización de fibra constante	de 4 mW a 25 mW
Modulación analógica	de 25 mW a 50 mW

Tabla 4 - Gama de potencias disponibles para los módulos de emisión.

(Failures In Time: un FIT equivale a un fallo en 109 horas) en quince años.

Entre los principales ensayos efectuados sobre el módulo se encuentran las pruebas cíclicas de temperatura de -40°C a +70°C (a 2°C/min) durante 500 ciclos. Los resultados obtenidos muestran que la eficacia de acoplamiento varía menos de $\pm 8\%$ del valor nominal, una prueba de la buena estabilidad de este módulo.

La segunda prueba importante de esta norma es la que se corresponde con el almacenamiento durante largo tiempo a 70°C. Los resultados muestran que durante 200 horas la eficacia de acoplamiento permanece entre el -5% y el +8% del valor nominal.

expectante frente a cualquier evolución tecnológica como, por ejemplo, la mejora de las características intrínsecas de sus productos y la fabricación de nuevas generaciones de sistemas con una velocidad más elevada (10 Gbit/s).

Alcatel Optronics dispone de casi un millón de láseres en la forma de obleas ya validadas y dispuestas a utilizar. Se ha realizado un gran esfuerzo para mejorar la capacidad de montaje de los módulos como se muestra en la **Tabla 5**.

En año y medio, esta capacidad se ha multiplicado por cinco hasta llegar a 500 piezas por semana, a finales de 1997. Una nueva ampliación de la capacidad está en marcha y debe permitir en los meses siguientes producir cerca de 1.000 cabezas ópticas por semana.

En paralelo, se ha hecho un esfuerzo importante para reducir los tiempos del ciclo de fabricación y adecuarlos a la demanda de los clientes. La constitución de los stocks produce láseres sobre apoyo semi-elaborados, seleccionados por longitud de onda, ha permitido reducir a la mitad estos tiempos del ciclo efectivo y garantizar el acortamiento del tiempo de entrega.

■ Despliegue Industrial de Alcatel Optronics

Todo lo anterior ha mostrado como Alcatel Optronics domina perfectamente todos los aspectos de la fabricación de láseres destinados a aplicaciones DWDM. Nuestra empresa continúa perfeccionando los medios industriales que permiten adaptar la fabricación a la progresiva y creciente demanda. Además, Alcatel Optronics permanece

■ Tendencias y evolución

Las previsiones más audaces en el campo de la optoelectrónica nunca parecen adaptarse a la realidad. Las experiencias en el campo de las comunicaciones sobre fibra óptica desde hace veinte años así lo confirman.

A las primeras instalaciones de sistemas de 4x2,5 Gbit/s en el año 1996, le han seguido la puesta en marcha de sistemas de 16x2,5 Gbit/s en 1997, y ya

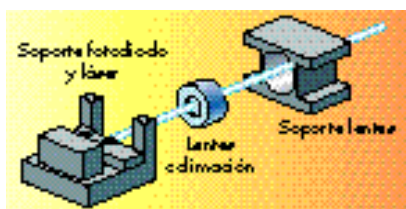


Figura 9 - Operación de montaje de la óptica primaria.

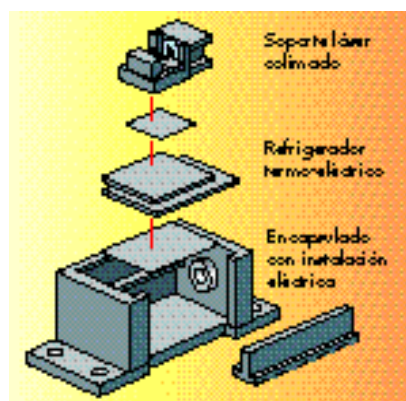


Figura 10 - Operación de montaje.

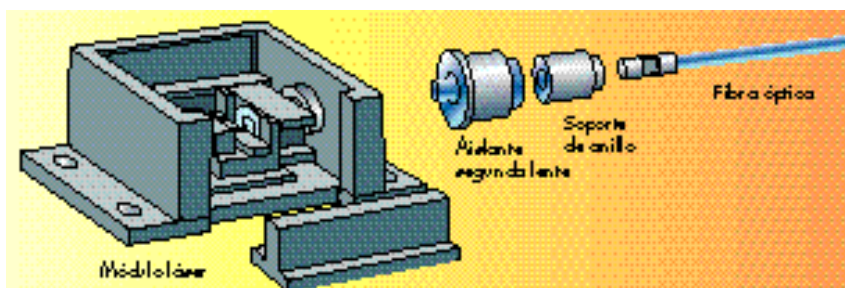


Figura 11 - Montaje de la segunda lente y del aislante óptico.

Capacidad semanal	Fecha
100 piezas/semana	2º trimestre de 96
250 piezas/semana	4º trimestre de 96
500 piezas/semana	4º trimestre de 97
800 piezas/semana	3º trimestre de 98

Tabla 5 - Incremento de la capacidad de ensamblaje de módulos desde 1996.

está planificado el despliegue de las generaciones de 32x2,5 e, incluso, 40x2,5 Gbit/s en 1998 y 1999 sobre una única fibra ¡Y esto es sólo la punta del iceberg!

La elección de longitudes de onda ofrecidas al usuario no cesa de crecer: la tecnología de semiconductores supera sus límites y, apenas después de haberse validado industrialmente un posible espaciado de los "colores" láser de 50 GHz (0,4 nm), ya se osa citar la cifra mágica de los 25 GHz.

En paralelo, la ventana de transmisión en la que las fuentes de láser se realizan, y en la cual los amplificadores presentan una ganancia plana, aumenta cada día. La banda de 30 nm actualmente utilizada pasará próximamente a 60 nm, ¡y se espera llegar a más de 1.600 nm!

Puede así imaginarse que un fabricante de componentes de emisión estará capacitado, muy pronto, para proponer un catálogo con 200 longitudes de onda a 2,5 Gbit/s, y no es impensable que Alcatel Optronics sea uno de los primeros en hacerlo.

Otra evolución importante está en marcha: los fabricantes de sistemas prevén realizar redes WDM a una velocidad base TDM (multiplexación por división temporal) de 10 Gbit/s, en lugar de 2,5 Gbit/s. En efecto, están apareciendo componentes ópticos a 10 Gbit/s que asocian fuentes láser y modulación externa (integrando de hecho las dos funciones) y serán pronto realizados a las longitudes de onda precisas requeridas por los sistemas WDM.

Nadie duda entonces que las grandes autopistas de la comunicación del

año 2005 serán multicolores a velocidades en línea de varias decenas de terabits/seg, y que el DWDM, tras su uso en las vías de acceso secundarias de ciudades y bucles locales y después de haber ganado los favores del tratamiento óptico de la información (enrutamiento y transconexión), se prepararán para su última etapa: ¡multiplicar los canales coloreados distribuidos al abonado!

Ciertos pensadores, o profetas, se comienzan a familiarizar con los Petabit/s (=103 Terabit/seg = 106 Gigabit/seg) ... ¡pero mantienen sus pies sobre la tierra!

Aún quedan varios retos tecnológicos importantes a vencer antes de llegar a este punto. Nuestros centros de investigación están inmersos en esta tarea. Alcatel Optronics, por su parte, se prepara activamente para vencer los retos industriales asociados a estas nuevas generaciones de productos.

Guy Mesquida está actualmente a cargo del Marketing y Comunicaciones Estratégicas en Alcatel Optronics, Nozay, Francia.

Claude Oguey es Director de Fabricación en Alcatel Optronics, Nozay, Francia.

CABLES ÓPTICOS AVANZADOS PARA COMUNICACIONES DE BANDA ANCHA

J.P. BONICEL
P. GAILLARD
G. ORCEL
B. OVERTON

Las claves para el éxito en el mercado de las fibras ópticas son diseños innovadores y tiempos cortos de desarrollo.

■ Introducción

En los próximos cinco años, se espera que la demanda global de cables de fibra óptica crezca entre un 15 y un 20% por año. En 1997, se instalaron 36 millones de kilómetros de fibra, un 21% de crecimiento respecto al año anterior [1]. Por ejemplo, varios grupos industriales y consorcios se han animado, al abrirse un mercado competitivo en los países del oeste de Europa, a comenzar la construcción de nuevos proyectos y redes troncales basados en fibra. Como resultado de este ola de construcciones, en 1997, Europa Occidental experimentó un crecimiento en demanda de cables de fibra óptica del 31%. La demanda de cables de fibra óptica en los mercados de telefonía local, TV por cable y comunicaciones de datos continúa creciendo, sumándose a la demanda de los mercados existentes de telecomunicación para larga distancia. La expansión de los mercados de telecomunicación en Europa Central, Lejano Oriente y Latinoamérica está contribuyendo también al crecimiento dinámico de esta industria.

A medida que avanzan las tecnologías, los cables de fibra óptica se están usando cada vez más en Redes de Acceso con fibra en el bucle de abonado (FITL) e Híbridas Coaxial-Fibra (HFC). Cuando se resuelvan los problemas actuales de altos costes de equipos y de instalación, será posible remplazar el cobre por fibras ópticas hasta la casa del abonado (FTTH). Como consecuencia,

se demandarán cables con relativamente pocas fibras, como cables de distribución y cables de abonado (hasta 6 fibras por cable).

A nivel internacional, 12 de los principales operadores de telecomunicaciones están trabajando juntos, en cooperación con Alcatel y otros fabricantes de equipos de telecomunicación, en la especificación de una Red Global de Acceso de Servicios (FSAN, Full Service Access Network), un nuevo tipo de red que tendrá un elevado mercado en gran número de países en un futuro cercano.

Los cables de fibra óptica se instalan directamente enterrados (en conductos subterráneos) o aéreos (en postes). Para asegurar una instalación correcta, se presta considerable atención a las propiedades mecánicas del cable, tales como resistencia a tracción, resistencia al impacto, aplastamiento, torsión, flexión y plegado cíclicos (en entornos calientes y fríos). También son importantes aspectos ambientales tales como capacidad del cable para resistir a la humedad, sustancias químicas y otras condiciones atmosféricas o subterráneas. Los nuevos requisitos del cable incluyen resistencia a roedores, termitas, aguas residuales, agua salada, vapor, vibraciones causadas por el viento, ráfagas de disparos, fuego, agentes químicos y otros entornos hostiles. Es también responsabilidad del fabricante de cable el asegurar que todos sus componentes funcionaran de forma fiable durante todo el periodo de vida útil, teniendo en cuenta el enveje-

cimiento natural, los factores ambientales y los ciclos de temperatura.

Los materiales tienen un papel clave en la producción de cables robustos de fibra óptica. Para proteger la fibra de vidrio, se seleccionan varios materiales y combinaciones de ellos. Los polímeros hacen posible la fabricación de cables con un amplio rango de características; a medida que el mercado crece, se están convirtiendo en un componente clave, cada vez más competitivo y global. Entre las características deseables del cable, se incluyen la reducción en el tiempo de preparación, ahorros significativos en el uso de mano de obra, eliminación de la necesidad de productos químicos para la limpieza del cable, manejo reducido de los tubos amortiguadores, y mayor flexibilidad en términos de disponibilidad de fibras (de 1 a 432 fibras).

Los cables deben ser también suficientemente robustos para cumplir las normativas industriales y un amplio abanico de requisitos de cliente, incluyendo protección del cable resistente en entornos extremos, recubrimientos o protecciones con resistencia a corrosión y bobinas con longitudes de hasta 10 Km., sin empalmes por fabricación.

■ Diseño de Cable Óptico

Cuando diseñan cables ópticos, los ingenieros del nuevo Centro mundial de Competencia de Cables de Fibra óptica (OFCCC) de Alcatel en Claremont,

Carolina del Norte, tienen en cuenta numerosos parámetros, como los mostrados en la **Figura 1**. El diseño de cables ópticos requiere laboratorios con capacidades avanzadas y competitivas en los campos de materiales, procesamiento del cable, diseño y modelado de cable, aplicaciones, fiabilidad y pruebas. Hasta hace poco, los diseños de cable se producían en estrecha colaboración con los laboratorios de investigación de los clientes; preparándose, al mismo tiempo, las especificaciones del cable. Ahora el mundo está cambiando rápidamente, según van apareciendo nuevos operadores en el mercado. Los clientes ya no desean verse involucrados en los detalles técnicos, sino que desean probar nuevos diseños en lugar de dedicarse a establecer sus especificaciones. Tan pronto como se anuncian los avances tecnológicos, y están disponibles en el mercado, los operadores están dispuestos a comprarlos. Este cambio está ayudando a impulsar la innovación.

■ Fibras Ópticas

Las fibras ópticas son el componente principal de cualquier cable óptico. El grupo de Investigación y Desarrollo del Centro de Competencia de Fibras ópticas de Alcatel en Conflans, Francia, y Claremont, Carolina del Norte, han desarrollado procesos que permiten fabricar fibras monomodo y multimodo de calidad mundial, cumpliendo todas ellas, e incluso superando, los requisitos industriales. Una característica importante es su compatibilidad para empalmes con fibras de otros fabricantes importantes, permitiendo que los clientes puedan mezclar cables de Alcatel con los de otros proveedores.

El crecimiento de las instalaciones de fibras ópticas para telecomunicaciones, TV por cable, redes de servicios y otras aplicaciones ha aumentado la importancia de la fiabilidad y la facilidad con la que pueden manipularse las fibras. Actualmente, una vez instalado un cable de fibra óptica se

espera que pueda ser usado durante décadas. Consecuentemente, la fibra y el cable deben ser robustos, fiables y capaces de ser manipulados repetidamente. El sistema exclusivo de Alcatel para recubrimiento de fibras AFC3 cumple todos estos requisitos [2,3,4].

El sistema para recubrimiento de fibras AFC3 proporciona un vínculo único entre el recubrimiento protector y la superficie de la fibra, dando una resistencia sin precedentes a la fibra. Esta característica se asegura y, en muchos casos, se mejora, durante las rigurosas pruebas de laboratorio realizadas bajo condiciones ambientales severas que duplican la larga duración del producto instalado. Fibras monomodo con el sistema de recubrimiento AFC3 garantizan al usuario una fibra fuerte con prestaciones fiables ahora y en el futuro.

Entre los principales beneficios del sistema de recubrimiento AFC3 se encuentran:

- Prestaciones mecánicas sin precedentes, incluyendo:
 - aumento con el tiempo de resistencia a tracciones,
 - la mejor prestación de fatiga estática de la industria
 - valores de fatiga dinámica por encima de 20, tanto al principio como con el paso del tiempo.
- Mayor resistencia a la atenuación que aumenta a bajas temperaturas.
- Excelente capacidad de estiramiento mediante métodos mecánicos o herramientas de estrusión en caliente.

El sistema de recubrimiento de fibras AFC3 consiste en dos capas de recubrimiento de acrilato diseñadas de forma especial. La capa de recubrimiento próxima a la fibra se hace con material de bajo módulo, que proporciona un acolchamiento suave para proteger la superficie de la fibra de cualquier fuerza de micro-flexión. La segunda capa, hecha con materiales de mayor módulo, proporciona fuerte protección externa. Esto asegura la flexibilidad de la fibra, al mismo tiempo que la protege contra la fatiga mecánica y la exposición ambiental.

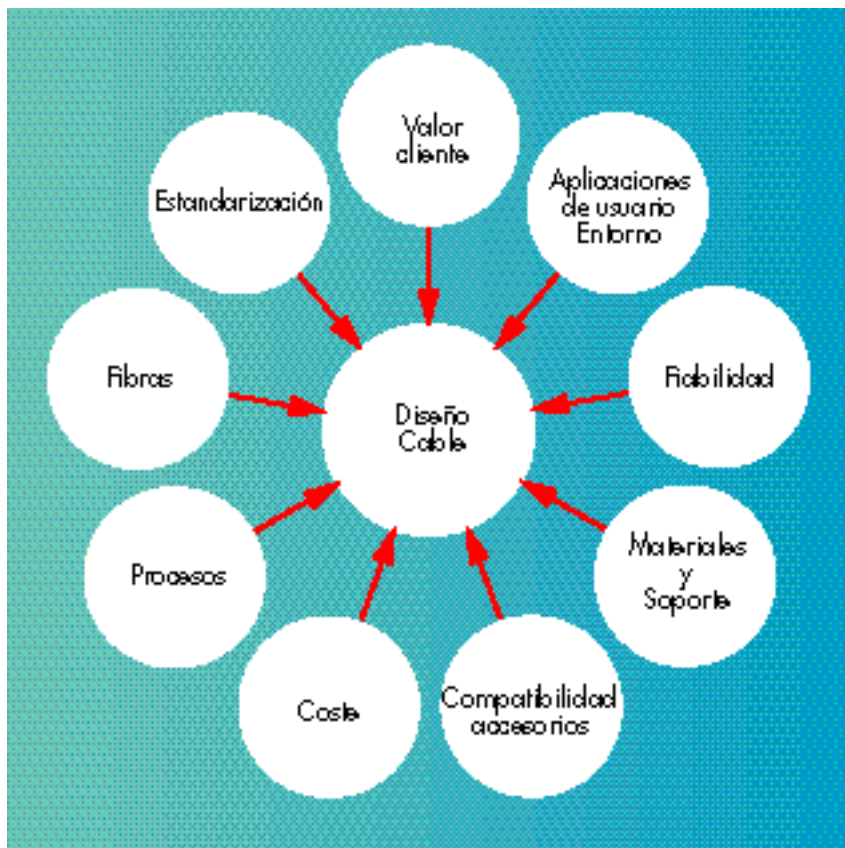


Figura 1 - Parámetros que deben considerarse al diseñar cables.

La primera capa se aplica inmediatamente después de extraer la fibra, creando una barrera entre la superficie del cristal original y cualquier contaminante externo, así como del medio ambiente. El sistema de recubrimiento no ataca la superficie del cristal, sino que la protege de la humedad y de otras condiciones medio-ambientales que pueden reducir la resistencia de la fibra y su periodo de fiabilidad. Por encima de todo, asegura al usuario la resistencia, prestaciones y fiabilidad de la fibra a largo plazo.

Como se muestra en la **Figura 2**, las fibras que se recubren usando el sistema AFC3 manifiestan un valor, destacado por la industria, de fatiga estática (n_s) de 36, que supera ampliamente el requisito industrial de $n_s = 20$, así como el valor n_s de otras fibras comerciales.

Alcatel ha introducido recientemente su nuevo proceso de recubrimiento ColorLock [5], que añade un color permanente y brillante para la fibra óptica monomodo (ver **Figura 3**). Este proceso innovador integra el color en el recubrimiento de fibras AFC3, reemplazando el método tradicional de aplicar color a la superficie de la fibra recubierta. Debido a que el color de la fibra es ahora una parte integrante del recubrimiento, siempre es consistente, distinguible y dependiente, además de proporcionar un excelente funcionamiento con los sistemas de fusión para empalmes de Detección e Inyección Local (LID).

Una utilidad adicional del sistema ColorLock es que suprime el paso de tintado en la producción del cable; eli-

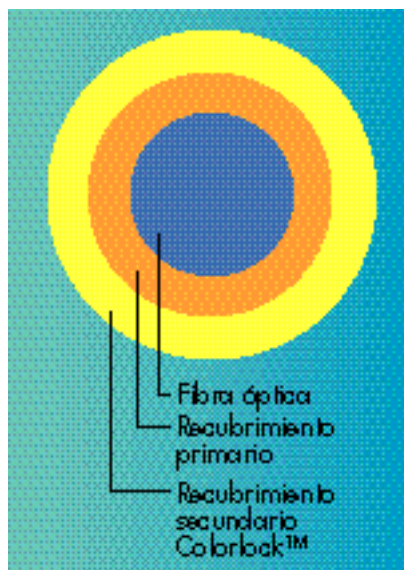


Figura 3 - Fibra óptica coloreada usando el proceso ColorLock de Alcatel.

mina la capa de tinta, intensifica el rendimiento y la fiabilidad de la fibra óptica.

Las tasas de transmisión más altas y los tramos más largos de transmisión sin repetidores están conduciendo a requisitos cada vez más estrictos en las características de transmisión de las fibras, tales como atenuación y dispersión. Incluso cuando se opera con una dispersión de longitud de onda cercana a cero, los sistemas de transmisión pueden verse afectados por la diseminación de las pulsaciones causadas por la Dispersión del Modo de Polarización (PMD). PMD es una propiedad de las fibras ópticas resultante de la bi-refringencia residual en la fibra después de su fabricación. Aunque

a las fibras de telecomunicación se les llame monomodo, de hecho el modo fundamental (o mono) consiste en dos polarizaciones mutuamente independientes que propagan en ángulos perpendiculares el uno respecto al otro. Esta característica se puede usar para hacer fibras de mantenimiento de la polarización, en las que hay un eje rápido y un eje lento ortogonal. Debido a que los índices refractivos efectivos a lo largo de ambos ejes son muy diferentes, no hay casi cambio de energía entre los dos modos de polarización. Una pulsación de luz emitida a lo largo del eje rápido llegará a un receptor distante antes que el pulso lanzado a lo largo del eje lento.

Las fibras monomodo para telecomunicación sólo tienen una pequeña bi-refringencia; la fuerza de la bi-refringencia (diferencia entre los índices refractivos efectivos) y las orientaciones de los ejes rápido y lento varían de un modo aleatorio a lo largo de la fibra y de una fibra a otra. Por consiguiente, la energía se intercambia entre los dos modos (un proceso conocido como acoplado de modos). Una pulsación emitida a lo largo de los ejes rápido y lento al principio de la fibra, más que separarse en dos pulsaciones diferentes que se alejan una de la otra, permanece como una sola pulsación que gradualmente se difunde según se incrementa la distancia de propagación. Esta diseminación se ve afectada por la aleatoriedad de la bi-refringencia en la fibra, por lo que la dispersión de la pulsación se incrementa con la raíz cuadrada de la distancia, más que linealmente con la distancia, tal y como ocurre con el caso de la dispersión cromática. Es más, la naturaleza estadística del PMD implica que, cuando un enlace está formado por una concatenación de fibras, el PMD para el enlace completo tiene relación con la cuadratura media del PMD de las fibras individuales, más que con la media lineal. Esto simplemente quiere decir que el coeficiente del PMD se trata como una desviación estándar para la diseminación de las pulsaciones, y la varianza resultante de la distribución es la suma de las varianzas de todas las fibras.

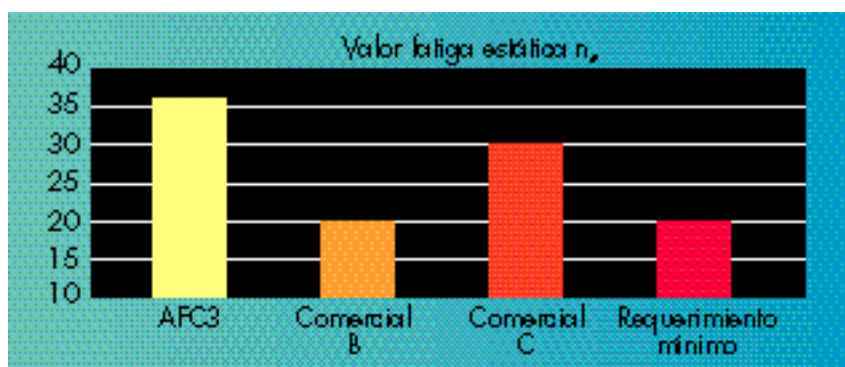


Figura 2 - Valor n_s de fatiga estática.

Los diseños de cables de fibra óptica de Alcatel han demostrado que proporcionan a las fibras ópticas un entorno libre de presiones, que nunca deberían causar un incremento del PMD de las fibras cableadas. Para garantizar las mejores prestaciones del sistema, deberán seleccionarse las fibras que tengan el PMD intrínseco más bajo. El control exacto del proceso asegura que las fibras ópticas de Alcatel poseen un PMD con una cuadratura media menor de 0,1 ps/km, líder en la industria.

■ Diseño y Materiales del Cable Actual

Alcatel ha desarrollado una gama completa de cables ópticos para satisfacer las necesidades de los diferentes clientes y aplicaciones.

Aplicaciones para los cables de telecomunicación y de CATV

La mayoría de los cables de telecomunicación y de CATV se instalan bajo el suelo; bien enterrados directamente, bien tirados, o metidos en conductos. Algunos se diseñan para instalaciones aéreas en postes alejados unos de otros.

Los diseños principales usados en planta externa son:

- cable con tubo amortiguador suelto
- mazo de fibras en tubo central, conocido como cable Unitubo
- cintas en tubo central, conocido como cable Unicinta
- cable de núcleo ranurado
- cable encintado con núcleo ranurado

Los clientes quieren cables que posean las siguientes características:

- instalación en conductos, enterrada o aérea
- flexibilidad
- accesibilidad a las fibras en tubos sueltos o cintas
- cables limpios para mejorar los procedimientos de empalme
- alta compatibilidad con accesos en tramos medios para cables con tubo amortiguador suelto, Unitubo y de cinta.

Alcatel ha mejorado sus cables ópticos existentes, y está desarrollando una nueva gama de cables ópticos teniendo en cuenta la evolución de los mercados de telecomunicación y de CATV y, en particular, el desarrollo de Redes de Área Metropolitana (MAN) y las redes ópticas de acceso.

Los materiales convencionales para tubos amortiguadores sueltos son poliamida (nylon 12) y Polibutileno Tereftalato (PBT). Recientemente, se ha hecho bastante popular en el mercado estadounidense un copolímero nucleado de polipropileno y polietileno [6].

El Material Avanzado de Amortiguación de Alcatel ABM2 (7) ofrece una flexibilidad, resistencia de enroscado y compatibilidad medio-ambiental superiores. No sólo permite un acceso más sencillo en tramos medios que los anteriores, ya que elimina la necesidad de tubos de direccionamiento en los cierres (caja de empalme), sino que también simplifica el enrollado y el acceso a las fibras, incluso a bajas temperaturas y en cerramientos pequeños con bordes dentados.

ABM2 ha conseguido un gran éxito y ha ayudado a intensificar el papel de liderazgo de Alcatel en la industria del cable de fibra óptica. Se utiliza en la mayoría de los productos de cables de Alcatel.

Cable con tubo amortiguador suelto

El cable con tubo amortiguador suelto es el producto principal de la línea. En este diseño, los tubos amortiguadores se enrollan alrededor de un Miembro Resistente Central (CSM). El CSM está formado por filamentos hechos de cristal-E injertados en resina epoxi para proporcionar resistencia al cable mientras se dobla, así como resistencia a la contracción a bajas temperaturas. Otros miembros resistentes incluyen hilos de poliéster y/o arámida para mejorar las propiedades de doblado, flexión y elasticidad de los cables. Los hilos de poliéster y de arámida también se usan como cabos de agarre para abrir cables en el campo.

Los diseños de los cables sin blindaje con un CSM de acero o dieléctrico pueden usarse tanto en aplicaciones en conductos como en aplicaciones aéreas.

Los cables blindados (ver **Figura 4**) se utilizan para aplicaciones en las que se requiera enterrar el cable. La cinta de blindaje es una cinta de acero ondulada, recubierta de copolímero, que se aplica sobre la cobertura interior. Se aplican componentes diluidos (poli-aceites de bajo peso molecular) sobre los tubos amortiguadores, y entre el blindaje y las envolturas interiores y exteriores para prevenir la entrada de agua.

Los materiales de las cubiertas interiores y exteriores son típicamente polietilenos de varias densidades (es decir, polietilenos de densidad alta, media baja y baja lineal), dependiendo de la aplicación y de los requisitos de usuario. La resistencia a los rayos Ultra-violeta (UV) se consigue añadiendo negro de carbón a los componentes, alrededor del 2.5% de su peso.

Los cables EZ Prep de tubo amortiguador suelto de Alcatel (ver **Figura 5**) eliminan la tarea laboriosa de limpieza de los tubos amortiguadores antes de acceder a las fibras (4). Se aplican cubiertas impermeables con forma contra-helicoidal (alternativamente en el sentido de las agujas del reloj y

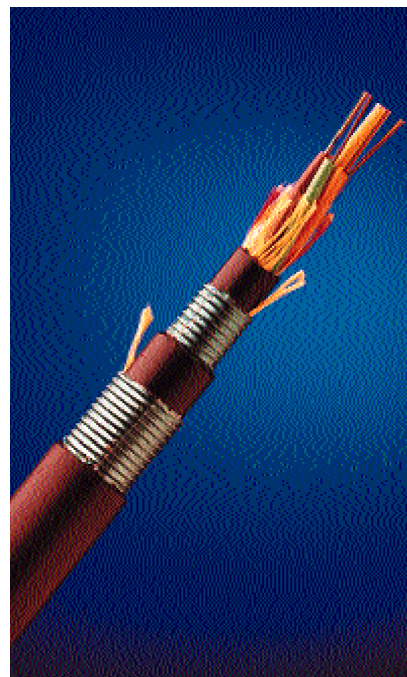


Figura 4 - Cable con tubo suelto de doble blindaje usando el material tubo amortiguador ABM2; puede incluir de 2 a 432 fibras.

en el sentido contrario) sobre el núcleo del tubo amortiguador ABM2 para evitar la entrada de agua. Los materiales innovadores para bloquear el paso del agua se pueden quitar en cualquier lugar de un modo rápido y sencillo, reduciendo de un modo significativo los costos de mano de obra. Estos cables disponen del mismo diseño robusto que los cables de tubo suelto relleno de Alcatel.

Cables Unitubo, Unicinta y con núcleo ranurado

Otro tipo de diseño de cables es el de tubos con amortiguador central. Las fibras ópticas están protegidas dentro de un tubo único de amortiguación que mantiene la integridad mecánica y óptica de las fibras y las protege de la tensión excesiva causada por el estiramiento, la temperatura o las cargas de vibración. Las fibras se pueden atar con hilos de colores para facilitar la identificación (Unitubo) o se pueden proveer como una cinta (Unicinta), que es un conjunto de 12 fibras fabricadas como una matriz (9). Las cintas se apilan en un tubo central (hasta 216 fibras en 18 cintas) para elevar al máximo la densidad de la fibra, minimizar el tamaño del cable, mejorar la capacidad de manipulación del ca-

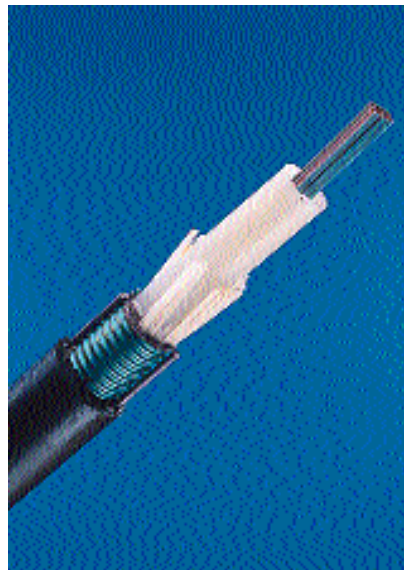


Figura 6 - Los cables Unicinta pueden albergar hasta 216 fibras en 18 cintas.

ble y agilizar el empalme de las fibras (ver **Figura 6**). Estas características dan como resultado un cable de menor tamaño y un abaratamiento de los costes de despliegue de la red.

Los cables de cinta con el núcleo ranurado (ver **Figura 7**) que incorporan 4, 6 ó 12 cintas de fibra se usan principalmente en Europa y Asia (9).

Cable encintado con tubo suelto

El cable encintado con tubo suelto de 432 fibras combina un tamaño reducido del cable con la facilidad de manipulación durante su instalación. Las fibras ópticas están alineadas en cin-

tas de 12 fibras, con 6 cintas apiladas en cada tubo amortiguador. Entonces los tubos amortiguadores se retuercen alrededor del miembro de la fuerza central (ver **Figura 8**).

Cable ADSS y aéreo figura 8

El cable auto-soportado figura 8 de Alcatel, con una cantidad de fibras entre 2 y 216, es ideal para las instalaciones aéreas. El elemento de apoyo incorporado (ver **Figura 9**) reduce los tiempos y costes de instalación. Aunque el miembro de apoyo es una parte integrante del recubrimiento del cable, permite soportar, agarrar, sujetar, tirar y tensar el cable. La instalación es rápida y sencilla si se usan las herramientas y métodos estándar de instalación del **figura 8**.

Alcatel ha desarrollado también una amplia gama de cables Auto Soportados totalmente Dieléctricos (ADSS) para ser usados cuando los clientes prefieran cables sin metal.

Cables ópticos de Alcatel

Los tubos amortiguadores y las cintas de tubo amortiguador de Alcatel se retuercen usando un sistema de oscilación invertida (se retuerce alternando en el sentido de las agujas del reloj y en el contrario). Los cables se retuercen del modo SZ para facilitar el acceso en tramos medios.

Alcatel ha desarrollado una técnica de marcado llamada Depósito de Oscilación Invertida (ROL) que sitúa de una manera clara y exacta las loca-

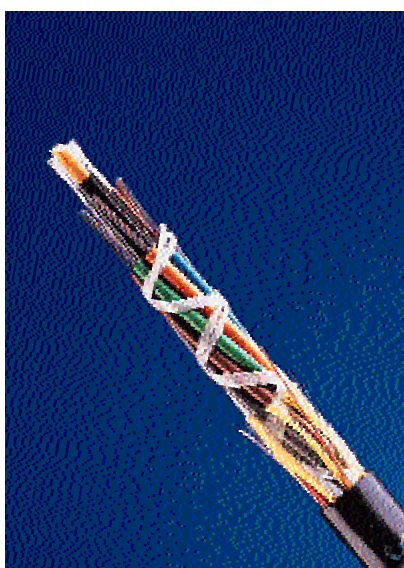


Figura 5 - Los cables con tubo amortiguador suelto EZ Prep usan tubos amortiguadores ABM2 y cubiertas impermeables sobre el núcleo para prevenir la entrada de agua.

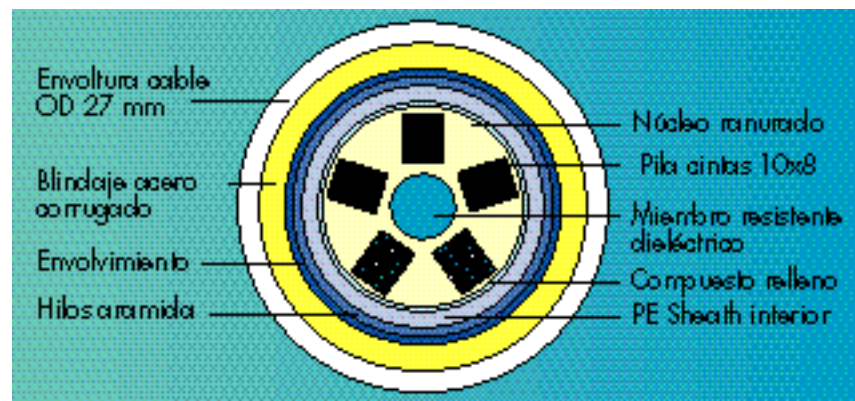


Figura 7 - Corte transversal de un cable de cinta de núcleo ranurado de alta capacidad (400 fibras) con 10 cintas de 8 fibras en cada hendidura.

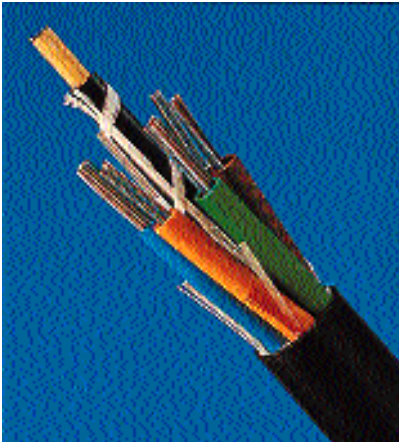


Figura 8 - Un cable encintado con tubo suelto de alta capacidad combina gran cantidad de fibras (hasta 432 fibras) con un pequeño tamaño, lo que facilita su manipulación durante la instalación.

lizaciones de los cambios (por ejemplo, los puntos de cambio de sentido del retorcido) para identificar el lugar apropiado para abrir la envoltura del cable.

La línea de productos EZ Prep de Alcatel combina todos los beneficios de la tecnología más avanzada de cables y fibras para el desarrollo de cables con prestaciones superiores para telecomunicaciones y aplicaciones CATV:

- Las fibras Alcatel tienen un PMD intrínseco muy bajo, que se mantiene gracias al diseño del cable.
- AFC3 es el único recubrimiento de la fibra que mejora con el tiempo la resistencia a tracción de la fibra.

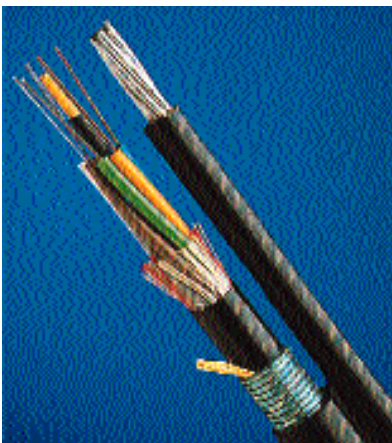


Figura 9 - Corte transversal de un cable figura 8.

- *Beneficio:* El cable de fibra óptica que se instala hoy estará incluso mejor protegido dentro de cinco años.
- El recubrimiento ColorLock integra los colores de las fibras en la capa secundaria de recubrimiento durante la fabricación, consiguiéndose un diámetro exterior de 245 ± 10 micrones (estándar industrial: 250 ± 15 micrones); la tensión de las fibras está probada al 100% con un 1% (100 kilopondios por pulgada cuadrada).
- *Beneficio:* Los colores de la fibra se mantienen claros y consistentes para siempre. La eliminación de las capas externas irregulares de tinta reduce el riesgo de microflección, especialmente a bajas temperaturas.
- Se diseñan cintas específicas de fácil pelado para los accesos en tramos medios.
- *Beneficio:* Se permite el acceso a cada fibra oscura sin cortar ni perturbar las fibras activas.
- Los tubos amortiguadores ABM2 son particularmente flexibles y resistentes al retorcimiento.
- *Beneficio:* menor riesgo de daños gravosos a las fibras; proporciona un cable fácil de manejar para aplicaciones de alta densidad en entornos reducidos.
- Los avanzados hilos absorbentes de agua EZ Prep, que se hinchan y sellan dejando fuera la humedad, reemplazan los compuestos tradicionales de relleno del cable.
- *Beneficio:* Ya no se gasta tiempo reemplazando los compuestos inundados y sucios.
- Las marcas ROL señalan de una manera clara y exacta las localizaciones de los cambios.
- *Beneficios:* Elimina conjeturas y maximiza la longitud de la fibra disponible para empalmes en tramos medios.
- La herramienta de pelado para acceso a la fibra abre los tubos de forma sencilla cuando se requiere una entrada en tramos medios o añadir enlaces en rutas no planeadas.
- *Beneficios:* Elimina procesos laboriosos para apertura de tubos, proporcionando un acceso a las fibras fácil y seguro.

Tendencias futuras en el diseño de cables ópticos para telecomunicación y aplicaciones CATV

Alcatel está mejorando constantemente las prestaciones de los cables y fibras para proveer productos mejores y más fiables. En particular, Alcatel está desarrollando cables que simplifican la instalación, especialmente en el caso de cables pequeños para redes de acceso, y cables voluminosos para redes troncales en MANs o redes de acceso. A continuación se dan algunos ejemplos:

- Los cables de tubo flexible Flextube (ver **Figura 10**) son una familia de cables completamente nueva en la que las fibras tienen un espacio libre muy limitado en un microtubo, lo que permite reducir el tamaño del cable. Estos cables ligeros y de pequeño diámetro son ideales para instalación posterior en conductos pequeños. Usar tales cables en obras pequeñas (reutilizando conductos existentes) permite a los operadores reducir significativamente el costo de instalar cables nuevos en áreas urbanas.
- El cable Uniflex es una evolución importante del diseño del cable Unitubo (ver **Figura 11**). Las ventajas son las mismas que las del cable microtubo. Estos cables están diseñados para albergar un número de fibras relativamente bajo, generalmente menos de 48 fibras.
- Los grandes cables Unicinta (ver **Figura 12**) son una evolución de los diseños existentes, pero con el cambio fundamental de dividirse en cintas de 24 fibras. Este diseño proporciona una densidad muy alta de fibras, alcanzando 1,5 fibras por milímetro cuadrado en el corte transversal del cable.
- Los grandes cables de núcleo ranurado (ver **Figura 13**) son una evolución del diseño existente de 400 fibras. Se están considerando dos diseños: usar una cinta de 4 fibras y aumentar el número de ranuras, o usar una cinta de 12 fibras y menos ranuras.

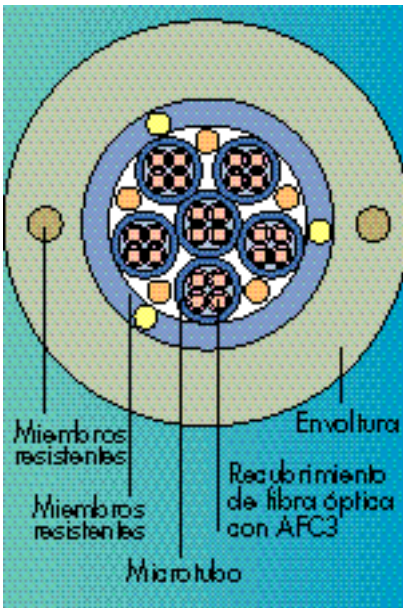


Figura 10 - Corte transversal de un cable Flextube de 24 fibras.

Cables para aplicaciones especiales

Alcatel ha desarrollado, fabricado e instalado una amplia gama de cables para aplicaciones especiales, incluyendo:

- cables sin halógeno, resistentes al fuego
- cables sin metal, resistentes a los roedores

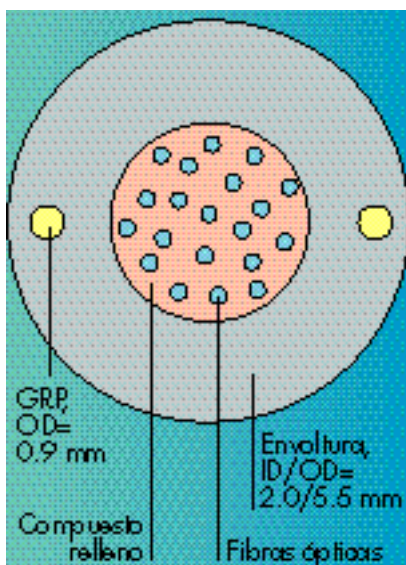


Figura 11 - Corte transversal de un cable Uniflex de 12 fibras.

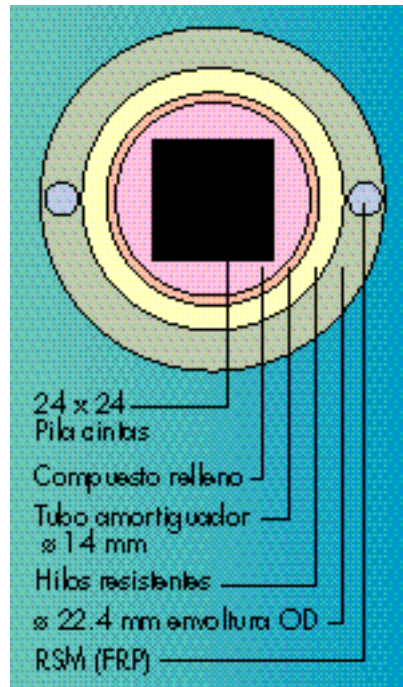


Figura 12 - Corte transversal de un cable Unicinta de 576 fibras.

- cables resistentes a las termitas
- cables ópticos para la industria petroquímica
- cables para uso en condiciones peligrosas (vapor, humedad, hidrógeno, petróleo)
- cables para sistemas de alcantarillado (túneles y cubetas de desagüe) en ciudades grandes
- cables para enlaces de larga distancia que puedan desplegarse en surcos hechos en la superficie de las carreteras.

A continuación se describen dos ejemplos con más detalle:

- El cable de fibra óptica de Alcatel para ambientes hostiles se diseña para ser instalado en lugares donde los cables normales de fibra óptica serían inapropiados (ver **Figuras 14 y 15**). Una barrera de cobre cosida/soldada protege las fibras ópticas de condiciones externas arriesgadas, incluyendo vapor y otras humedades, hidrógeno, petróleo y otros productos químicos, y de roedores. Ondulando la barrera de cobre se consigue un cable más flexible para instalaciones subterráneas y enterradas.
- El cable de Alcatel para instalaciones en zanjas de carreteras es de sólo 8 mm de diámetro, aunque incorpora 60 fibras. Se puede instalar en una zanja de sólo 30 mm. de profundidad y 10 mm. de anchura, reduciendo considerablemente el costo de las obras civiles y de la instalación del cable (ver **Figura 16**). Ya se han instalado más de 1.000 km. de este cable.

Cables para aplicaciones aéreas en las líneas de alto voltaje

Alcatel ha desarrollado una gama de cables para aplicaciones aéreas. Se pueden clasificar en tres grandes familias:

- Líneas Ópticas Terrenas (OPGW): Dos diseños básicos usando un nú-

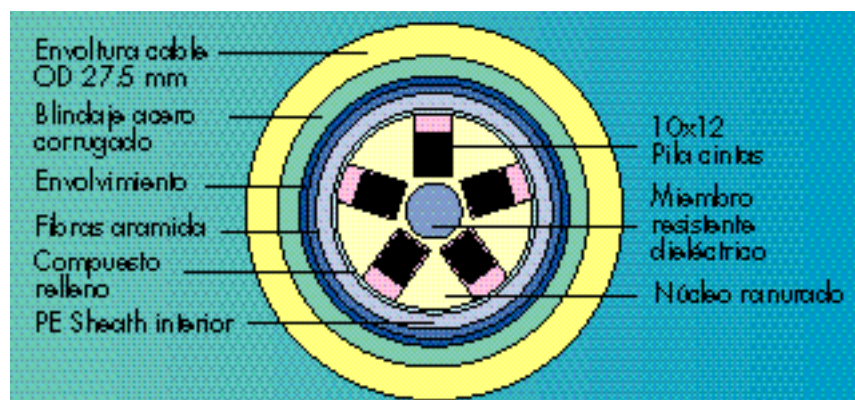


Figura 13 - Corte transversal de un cable de núcleo ranurado de 600 fibras.



Figura 14 - Las fibras están protegidas por materiales especiales, incluyendo un tubo ondulado y soldado de cobre.

cleo ranurado de aluminio con o sin un tubo soldado también de aluminio y un tubo soldado de acero inoxidable totalmente relleno [10, 11, 12, 13].

- Cable Auto-Soportado Totalmente Dieléctrico (ADSS): Dos diseños, usando una estructura de tubo suelto o una estructura Unitubo. Se debe seleccionar cuidadosamente el material de la envoltura según el voltaje transportado por las líneas, de manera que no haya ningún riesgo de descargas [14,15,16].
- Cables Adosados ópticos Aéreos (OAAC): Dos diseños básicos usando una técnica de enlazado o una envolvente.

El desarrollo de cables aéreos requiere muchas pruebas. Además, todo el uti-

llaje suministrado al cliente debe estar totalmente cualificado.

■ Conclusión

Alcatel ha desarrollado una amplia gama de cables de fibra óptica para proveer las diferentes necesidades de sus clientes. En todos los casos, se ha puesto el énfasis en analizar las aplicaciones de los clientes para asegurar que Alcatel puede proveer los productos más deseables.

Ideas innovadoras, frecuentemente desarrolladas en asociación con los clientes, combinadas con cortos periodos de desarrollo, son las claves del éxito. Nuestra experiencia en el diseño y fabricación de fibras ópticas y cables ópticos, y nuestra habilidad para integrar estos productos a nivel mundial, son los fundamentos de nuestros desarrollos de cables ópticos fiables y de alta calidad para un amplio abanico de aplicaciones.

Como nuestros clientes demandan soluciones globales de forma creciente, tenemos que proveer no sólo cables ópticos, sino también los componentes asociados y, en algunos casos, la ingeniería de instalación. Las unidades de Cables y Componentes de Alcatel están ya preparadas para proveer esta necesidad emergente.

■ Referencias

- 1 Basado en contribuciones presentadas por R.Mack y C.Xu, KMI Corporation, al 20th Newport Conference on Fiberoptics Markets, Octubre 2022, 1997.
- 2 B.Overton, A.Lopez, S. Reddy: "Correlating the Material Properties of Fiber Optic Coatings with the Strength and Reliability of the Coated Product", Proceedings, National Fiber Optic Engineers Conference, 1994.
- 3 B.Overton: "The Effects of Coating Characteristics on the Determination of the Dynamic Fatigue Parameters for Optical Fibers", Proceedings, National Fiber Optic Engineers Conference, 1995.

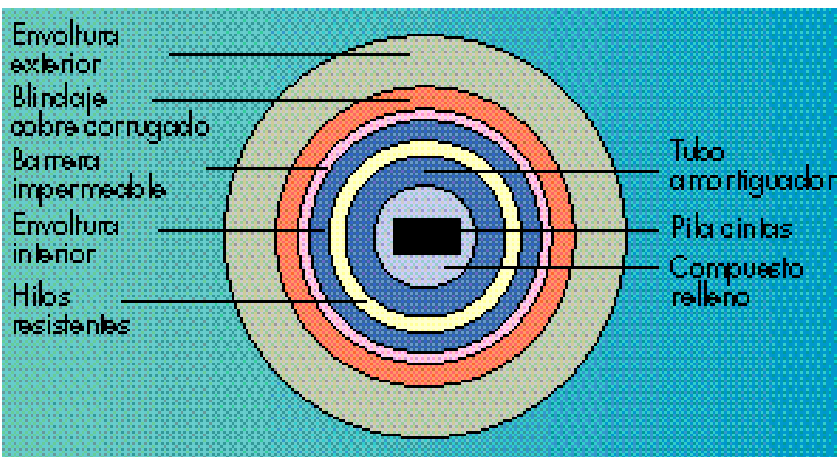


Figura 15 - Corte transversal de un cable resistente al vapor.

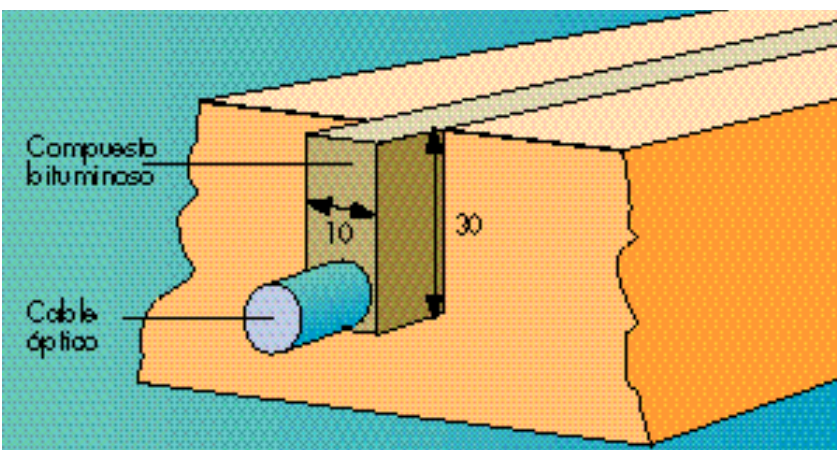


Figura 16 - Instalación de un cable pequeño, de alta densidad de fibras, en una zanja de una carretera.

- 4 "Generic Requirements for Optical Fiber and Fiber Optic Cable", documento de Bellcore GR-20-CORE.
- 5 C. Hutton, B. Overton: "Optical Fiber Dual Coating with Built-in Colour", Proceedings, National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC), 1997.
- 6 H.M. Yang, J.D. Holder, C.W. McNutt: Patente US, N° 5, 574, 816 (1996).
- 7 M. Adams, J. Holder, C. McNutt, O. Tatat, H.M. Yang: Buffer Tubes The Next Generation, IWCS, 1995, pág. 16.
- 8 P. Gaillard, C. McNutt, J. Holder, A. Bouvard, O. Tatat: "Significant Improvement of Loose Tube Cable Spliceability Based on New Cable Dry Design", IWCS, 1996, pág. 353.
- 9 J-P. Bonicel, D. Keller, G. Kylene, G. Paternostro, C.G. Berthelsen, C. Lasne: "An International Development on Ribbon Technology and Evaluation of Applicability to National Specification", Proceedings, International Wire Cable Symposium, 1992, pág. 2531.
- 10 J-P. Bonicel, C.G. Cortines, J.C. Delomel, G. Hog, S. Pouilly, O. Tatat, P.E. Zamzow: "Optical Ground Wire A Worldwide Technical Survey and Comparison", Proceedings, International Wire and Cable Symposium, 1993.
- 11 J-P. Bonicel, O. Tatat, U. Jansen, G. Couvrie y otros: "Lightning Strike Resistance of OPGW", Proceedings, International Wire and Cable Symposium, 1995.
- 12 C. Bastide, O. Tatat, T. Verhaege: "New Effective Method to Calculate Temperature Increase During Short Circuit OPGW Cables", Proceedings, International Wire and Cable Symposium, 1997.
- 13 J-P. Bonicel, O. Tatat, R. Girbig, G. Hog: "OPGW, Do they Creep Differently", Proceedings, International Wire and Cable Symposium, 1997.
- 14 D. Keller, O. Tatat, R. Girbig, M. Adams, R. Bohme, C. Larsson: "Design and Reliability Considerations for Long Span. High Voltage, ADSS Cables", Proceedings, International Wire and Cable Symposium, 1995.
- 15 D. Keller, D. Benzel, J-P. Bonicel, C. Bastide, F. Davidson: "Continued Investigations of ADSS Designs and Reliability Considerations With Respect to Field Voltage Tracking, and Cable Installation Practices", Proceedings, International Wire and Cable Symposium, 1997.
- 16 H.G. Haag, G. Hog, U. Jansen: "LWL-Phasenseilanwendungen Bei Der Deutschen Bahn", Signal and Draht, 1997.

Jean-Pierre Bonicel es el responsable de Producto de la Línea de Productos de Alcatel Telecom en Europa, localizada en Clichy, Francia.

P. Gaillard es Director Adjunto del Centro de Competencia de Fibra Óptica de Alcatel en Claremont, Carolina del Norte, EE.UU.

Gerard Orcel es ingeniero de la Línea de Productos de Fibra Óptica trabajando en diseño de proformas, CVD, y en el desarrollo de tecnologías de recubrimiento y trazado de fibras en el Centro de Competencia de Fibra Óptica de Alcatel en Conflans, Francia.

Bob Overton es el responsable del Grupo de Tecnologías de Recubrimiento en el Centro de Competencia de Fibra Óptica de Alcatel en Claremont, Carolina del Norte, EE.UU.

IMPACTO DE LA INFRAESTRUCTURA DE FIBRA EN LA TRANSMISIÓN POR WDM

A. BERTAINA
J-L. BEYLAT
S. BIGO
M. W. CHBAT

En los sistemas de transmisión terrestre por WDM, funcionado a 10 Gbit/s, se necesita diseñar cada enlace para cumplir las limitaciones físicas.

■ Introducción

En los próximos años, el crecimiento de los servicios existentes y la introducción de otros nuevos hará crecer significativamente el tráfico en las redes de telecomunicaciones [1]. Algunos servicios, tales como la telefonía tradicional, crecerán lentamente, mientras que los servicios más nuevos, tales como la telefonía móvil, el tráfico de datos y de imágenes, se extenderán muy rápidamente. Los servicios futuros variarán mucho en términos de capacidad de canal requerida (por ejemplo, la velocidad binaria), de ocupación de canal (tráfico continuo o intermitente), de la duración de la conexión, del tiempo de establecimiento de la misma y de su frecuencia.

Durante la pasada década, el avance de la técnica de las fibras ópticas ha tenido un impacto considerable en las redes de telecomunicaciones, ayudando a mitigar los cuellos de botella del ancho de banda de transmisión y reduciendo significativamente los costes relacionados con la distancia. Las fibras ópticas ya se utilizan ampliamente en redes de transmisión de larga distancia y con velocidad binaria alta, en las cuales los operadores nacionales están desplegando mezclas de redes ópticas Synchronous Digital Hierarchy (SDH) y Synchronous Optical Network (SONET) [2], funcionando a 2,5 Gbit/s (STM-16/OC-48) sobre fibras ópticas estándar. No obstante, la demanda futura anticipada

de capacidad de información requerirá canales de producción que vayan desde varios cientos de Gbit/s a unos pocos Tbit/s, al comienzo del próximo siglo. Las comunicaciones ópticas tratarán este espectacular aumento usando la multiplexación por división de longitud de onda (WDM) para mejorar las redes de transporte existentes. Además, haciendo un uso eficiente de sus principales propiedades, tales como la longitud de onda, la técnica de fibras ópticas hará posible en el futuro la introducción de esquemas de enrutamiento totalmente ópticos [3].

La WDM se basa en multiplexar va-

rios canales modulados, utilizando cada uno una longitud de onda portadora diferente, sobre la misma fibra. De esta forma, el canal de producción total es simplemente la suma de las velocidades binarias de los canales individuales. Cualquier limitación de la propagación por fibra producidos por los efectos lineales en la fibra, tal como la Group Velocity Dispersion (GVD) y la Polarization Mode Dispersion (PMD), sólo está relacionada con la velocidad binaria de cada canal individual.

Actualmente se están ofreciendo por los fabricantes de equipos de telecomunicación sistemas de transmisión por WDM con velocidades de ca-

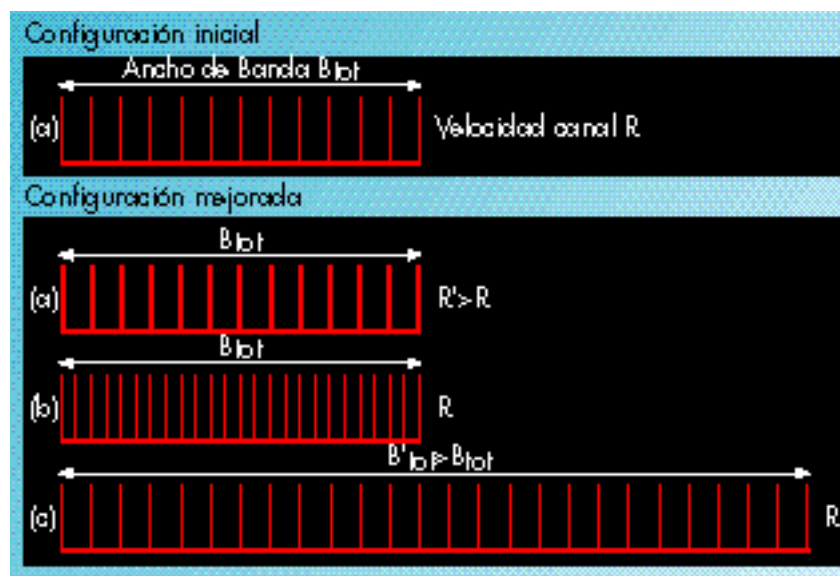


Figura 1 - Tres métodos para incrementar la capacidad del sistema.

nal individual de 2,5 Gbit/s, mientras que ya están apareciendo sistemas de N10 Gbit/s [4]. La mejora de la red que se necesita para alcanzar el incremento anticipado en el total del canal de producción se puede obtener utilizando tres métodos diferentes (ver **Figura 1**). El primero consiste en incrementar la velocidad binaria del canal (**Figura 1a**). Aparte de la necesidad de tecnologías electrónicas de alta velocidad, el inconveniente de este método es la limitación impuesta por la GVD y por la PDM. Ambas restringen la distancia de propagación, la cual decrece con el cuadrado de la velocidad del canal. El segundo método (**Figura 1b**) consiste en añadir más canales y empaquetarlos muy juntos, ocupando el mismo ancho de banda óptico. En este caso, el rendimiento del sistema está limitado por varios efectos no lineales en la fibra óptica [5], como se indica más abajo, y por la dificultad de la selección de canal (multiplexión y demultiplexión). El tercer método (**Figura 1c**) consiste en expandir el ancho de banda útil añadiendo más canales al tiempo, lo cual asegura una separación de canales relativamente grande. No obstante, esto requiere amplificadores ópticos de banda ancha que puedan tratar varias decenas de canales muy separados (una ventana total de amplificación de alrededor de 40 nm). A pesar de la activa investigación en este área, la tecnología de estos amplificadores está todavía en sus comienzos. Además, el rendimiento de estos sistemas estará físicamente limitado por otro efecto no lineal, conocido como difusión de Raman estimulada, cuyo impacto será más grande en cuanto aumente el ancho de banda total ocupado.

De esta forma, aumentado el total del canal de producción de los sistemas de transmisión por WDM se hará frente al menos a dos obstáculos mayores: los efectos tecnológicos y físicos en la fibra. Este artículo se ocupa de estos últimos. Se puede fácilmente argumentar que los efectos físicos que afectan a la transmisión de la señal óptica dependen en su mayor parte de

las características propias de la fibra: atenuación, GVD, PMD y grado de no linealidad.

■ Tipos de Fibras

Las infraestructuras de transmisión existentes usan cuatro tipos de fibras, todas las cuales tienen prácticamente la misma pérdida, de 0,20 a 0,21 dB/km. En primer lugar, difieren en su característica GVD, como se muestra en la **Figura 2**. La GVD es el fenómeno por el que los componentes espectrales individuales de una señal se propagan a diferentes velocidades, dando lugar a desplazamientos acumulados temporales con la distancia, lo cual al final causa errores y distorsiones de los pulsos. Estos efectos perjudiciales son proporcionales a la raíz cuadrada de la velocidad binaria. La GVD se caracteriza por el parámetro D , el cual se puede asumir como lineal con longitud de onda para una buena aproximación:

$$D = D' \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)$$

donde D' y λ_0 son respectivamente la pendiente de dispersión y la longitud de onda de dispersión cero. Son las características de una fibra concreta.

Históricamente, la Fibra estándar

Single Mode (SMF, Recomendación G.652) fue la primera utilizada en las redes y aún permanece como la más expandida, representando alrededor del 85% de toda la fibra en el mundo. Durante algún tiempo, la SMF ha cumplido con todos los requisitos de transmisión, principalmente porque la pérdida baja ha sido el único problema. No obstante, el incremento de la velocidad binaria ha tropezado con los efectos cromáticos de la dispersión a 10 Gbit/s y a velocidades superiores, ya que la SMF tiene una alta dispersión cromática D de 17 ps/nm.km. a 1.550 nm, si no se añaden elementos compensadores.

Para superar estas limitaciones de GVD se diseñó un nuevo tipo de fibra con GVD cero ($D=0$), conocida como fibra con dispersión desplazada (DSF, Recomendación G.653). Hasta ahora, ha sido utilizada en primer lugar en conexiones con islas y penínsulas, usando frecuentemente enlaces submarinos. Aunque la DSF ha demostrado que es muy adecuada para los sistemas de transmisión simple de canal, no es compatible con la WDM. Esta incompatibilidad se puede explicar por la no linealidad Kerr, esto es, la dependencia lineal del índice de refracción de la fibra en la potencia de canal inyectada. El silice, el principal componente de las fibras, tiene uno de los

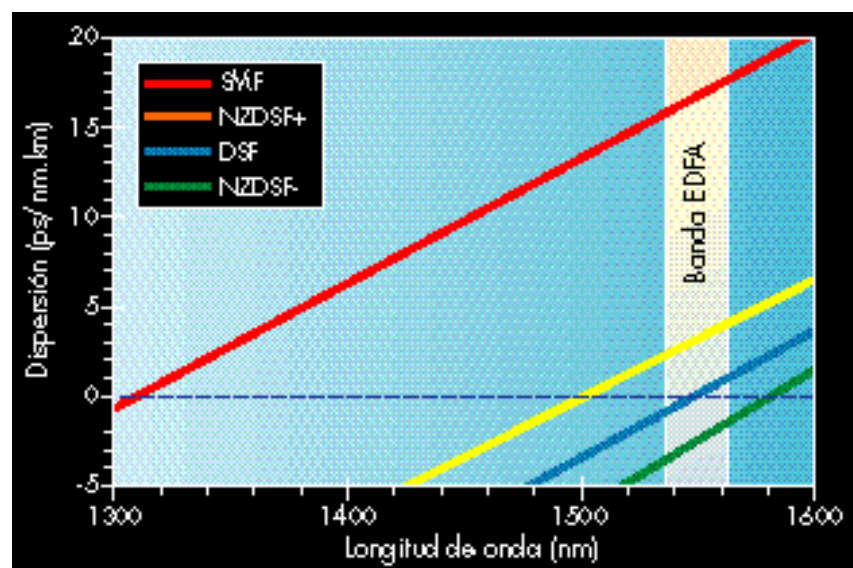


Figura 2 - Características de la dispersión de la velocidad de grupo de las fibras disponibles.

más bajos coeficientes de no linealidad (n_2) de cualquier material óptico. Sin embargo, las distorsiones de señal inducida Kerr pueden existir a potencias razonables (unos pocos dBm) en la fibra a causa de las grandes distancias recorridas y el confinamiento de energía. Este confinamiento se caracteriza por el área efectiva de la fibra A_{eff} : la más pequeña A_{eff} , la mayor para las no linealidades ($A_{\text{eff}} = 50 \mu\text{m}^2$ para la DSF).

Varios efectos, generalmente perjudiciales, resultan de las no linealidades Kerr. En la DSF, la limitación más severa es la generación de productos de intermodulación entre las portadoras de un multiplex, un fenómeno inherente a la WDM llamado mezcla de cuatro ondas (FWM). En una fibra no lineal que porte dos o tres canales de WDM, la FWM puede crear frecuencias adicionales (conocidas como productos de intermodulación) si una cierta condición de adaptación de fases se cumple, esencialmente si la dispersión relativa entre los canales es bastante baja. Asumiendo que los canales de WDM están igualmente separados, las longitudes de onda de los productos de intermodulación coinciden con las longitudes de onda de otros canales, creando así una indeseable diafonía dentro de la banda.

Un sencillo camino para evitar la FWM consiste en la reducción de la adaptación de fases entre canales. Para alcanzar esto, debe incrementarse la dispersión relativa entre canales vecinos, por lo que deben viajar a velocidades de grupo muy diferentes, esto es, deben colocarse fuera de la longitud de onda cromática cero. Para lograrlo se han diseñado nuevos tipos de fibras, conocidas como fibras de dispersión desplazada Non-Zero (NZDSF). Estas tienen una dispersión baja, pero no cero, en la ventana espectral del Amplificador de Fibra Dopada de Erblio (EDFA), que está típicamente entre 2 y 6 ps/nm.km. Las fibras NZDSF son de dos tipos con dispersiones positivas y negativas, llamadas aquí NZDSF+ y NZDSF-, respectivamente.

Aunque las limitaciones causadas por la FWM son significativamente

también deben tenerse en cuenta otros dos fenómenos no lineales cuando se enjuicia totalmente el rendimiento de un sistema basado en la NZDSF. Estos también provienen de la no linealidad Kerr. En el primer efecto, conocido como automodulación de fase (SPM), la fase óptica de un canal se modula proporcionalmente a su propia potencia instantánea. La SPM aparece como un ensanche del espectro del canal, ya que se generan nuevas frecuencias ópticas. No obstante, después este efecto inicialmente afecta a la fase de señal; éste no afecta a la detección de intensidad en el receptor final, a menos que la dispersión cromática no sea cero. En efecto, la interacción de la SPM y la GVD da lugar a un complicado proceso de conversión fase a intensidad durante la propagación. Dependiendo de la GVD, la SPM puede ser o bien beneficiosa, dando lugar a la compresión de impulsos, o perjudicial, dando lugar posiblemente a una irrecuperable desintegración de los impulsos ópticos.

El segundo efecto no lineal a considerar es la modulación de fase cruzada (XPM). Como en la SPM, este fenómeno se manifiesta por sí mismo como una alteración de la fase óptica de un canal, la cual se traduce en distorsiones de intensidad mediante la GVD. No obstante, como contraste con la SPM, es un efecto multicanal, por el cual la modulación de fase de un canal se induce mediante la intensidad de la señal en el canal o canales vecinos. De esta forma, depende de las velocidades relativas de los canales que interaccionan, es decir, de la GVD. La más baja la GVD (y por tanto la diferencia de velocidades de canal), la más alta la interacción entre canales. No obstante, en GVD igual a cero, no hay conversión fase a intensidad. Consecuentemente, no es un tema fácil evaluar el impacto del XPM y de los otros fenómenos relacionados con Kerr.

Basándonos en las consideraciones descritas arriba, podemos afirmar que es esencial una herramienta de simulación para predecir, con una precisión razonable, el rendimiento de transmisión de los sistemas perjudicados tanto por no linealidades de canal

simple, como por no linealidades de canal múltiple. Además, dado el gran número de parámetros involucrados en la transmisión por WDM sobre diferentes tipos de infraestructura de fibra, y la dificultad de aislar los efectos físicos individuales para evaluar su impacto en el rendimiento del sistema, un método basado exclusivamente en experimentos no es factible. A continuación se considera el uso de una herramienta de simulación para estudiar el rendimiento de la transmisión de un sistema de WDM con un canal de producción de 320 Gbit/s sobre la NZDSF+ y la NZDSF-.

En el transmisor, 32 canales de 10 Gbit/s, decorrelacionados aleatoriamente, separados en 100 GHz aparte son generados con velocidades de onda que van de 1535.04 nm (canal 1) a 1559.78 nm (canal 32). La línea de transmisión está formada por cinco tramos de 100 km. de largo con un gran presupuesto de potencia de 28 dB por tramo para cumplir con los requisitos del campo. Las características de las fibras analizadas (en todos los ejemplos de este artículo) se resumen en la **Tabla 1**; estas se corresponden con las fibras comerciales típicas. Hay que hacer notar que los nuevos tipos de NZDSF, con áreas efectivas más grandes o con dispersiones más grandes que la primera generación de NZDSF, se han suministrado muy recientemente. Estos tipos no se han considerado aquí. Las simulaciones no consideran el ruido del amplificador para calcular solamente las limitaciones resultantes del GVD y los efectos Kerr no lineales. No obstante, la potencia por canal en la salida del amplificador se estableció a +5 dBm para cumplir el requisito mínimo relación señal ruido (SNR) al final de la cascada del amplificador óptico.

Para evaluar la calidad de transmisión, utilizamos el criterio de penalización de potencia. En general, se considera que un valor de más de 3 dB es inaceptable. La **Figura 3** muestra las penalizaciones del sistema en la que incurren todos los canales en el receptor, incluyendo no linealidades cruzadas (multicanal) u otras (canal simple). En el caso de la NZDSF, se

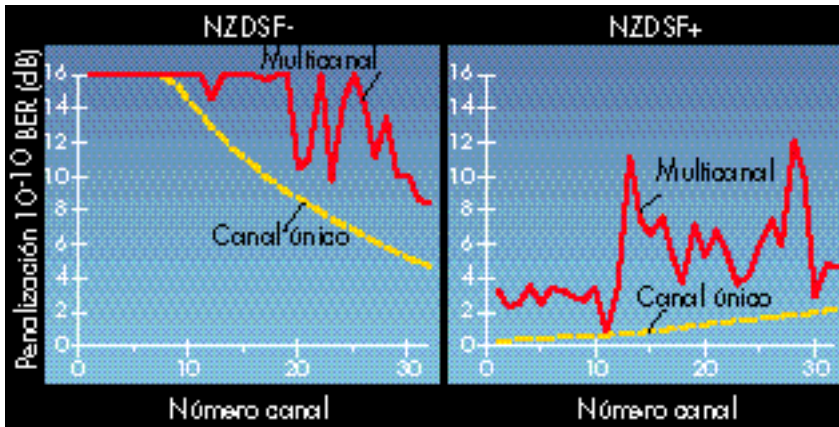


Figura 3 - Rendimiento de la transmisión simulada de un múltiplex de 32x10 Gbit/s sobre NZDSF y NZDSF+, sin compensación GVD.

Tipo fibra	Dispersión (ps/nm.km)	Fundente dispersión (ps/nm ² .km)	Pérdida (dB/km)	Índice no lineal (10 ⁻²⁰ m ² /W)	Área efectiva (μm ²)
SMF	17.0 ±1.541 nm	0.07	0.2	27	80
NZDSF+	00 ±1.505 nm	0.07	0.2	27	57
NZDSF-	00 ±1.583 nm	0.07	0.2	27	57
DSF	800 ±1.541 nm	0.12	0.6	7.0	30

Tabla 1 - Parámetros típicos de fibra usados en todas las simulaciones.

puede ver que las penalizaciones en multicanal son siempre mayores de 8 dB, mientras que las penalizaciones en canal simple exceden en 5 dB. Por contra, utilizando la NZDSF+, la transmisión por canal simple es posible ya que las penalizaciones son menores de 2 dB, debido al efecto beneficioso de la SPM en el régimen anómalo de dispersión. Sin embargo, las no linealidades cruzadas aumentan de una forma prohibitiva las penalizaciones del sistema.

Como conclusión, tanto la NZDSF, como la SMF o la DSF no se pueden utilizar como un medio de "caja negra" para transportar información a más de 100 Gbit/s a 500 km., lo que significa que la fibra ideal de WDM para aplicaciones terrestres probablemente tiene que ser aún desarrollada. No obstante, todos estos tipos de fibras se han desplegado con alto coste en infraestructuras de todo el mundo. El hacer frente a las limitaciones físicas de todas

las infraestructuras existentes, desde la más antigua SMF a la más reciente NZDSF, es así un importante reto para todos los suministradores de sistemas ya que estas pueden tener un serio impacto en el diseño del sistema.

■ Tomando lo Mejor de las Infraestructuras Existentes

En un esfuerzo para mejorar las infraestructuras existentes, una característica de todas las fibras debería ser tomada en cuenta: su PMD. Ya que las fibras tienen perfiles circulares, los modelos tienden a olvidar el hecho de que la luz es un factor. Este método generalmente es verdad, pero tales imperfecciones alteran la composición ó geometría local de la fibra durante su fabricación, los dos componentes de polarización del campo eléctrico pueden viajar a velocidades diferentes de una forma aleatoria, causando el

ensanche de impulsos perjudiciales al final del enlace.

Los efectos PMD son comunes a todos los tipos de fibras a velocidades binarias altas. No obstante, las fábricas de fibras han mejorado sus productos al extender estas infraestructuras basadas en las fibras actuales las cuales no sufren más el PDM a 10 Gbit/s. En consecuencia, a esta velocidad binaria, la PMD es sólo crítica en infraestructuras más antiguas, formadas en principio por SMF. En tales infraestructuras, la velocidad de canal debe limitarse a 2,5 Gbit/s o se deben utilizar técnicas de compensación PMD. No obstante, estas técnicas están todavía en desarrollo. También deben estudiarse otras limitaciones inherentes a la infraestructura de fibra.

Los sistemas basados en DSF son probablemente los más difíciles de mejorar utilizando la WDM a causa de las fuertes no linealidades cruzadas que les afectan, especialmente FWM, como se discutió arriba. Se han ideado varias soluciones para evitar las limitaciones FWM. Un modo eficiente es utilizar una separación de canal desigual, de forma que ningún producto de intermodulación caiga sobre un canal existente [6]. No obstante, esta solución limita la ocupación espectral del canal y por tanto eventualmente el número de canales transmitidos, reduce la flexibilidad de asignación de canal y complica la gestión de canales en las redes WDM.

Otra forma de limitar la FWM se basa en la condición de adaptación de fases mencionada previamente. Esta condición muestra que los productos de intermodulación son fuertemente dependientes de la polarización de los canales. En particular, se ha demostrado que girando 90° la polarización de los canales adyacentes en el transmisor se puede reducir significativamente la FWM. No obstante, la polarización de los canales alternativos permanece paralela, de esta forma los correspondientes productos de intermodulación son todavía altos. Además, la configuración de polarización en el transmisor no se puede mantener a través de la línea de transmisión, de forma que al final la FWM reaparece.

La forma más práctica de reducir la FWM sobre la DSF es romper la condición de adaptación de fases con una GVD distinta de cero. Para alcanzar una dispersión cromática distinta de cero utilizando la DSF, la mejor técnica es trabajar con longitudes de onda fuera de la tradicional ventana EDFA. Esto equivale a cambiar la DSF por su NZDSF equivalente, lo que implica que nos estamos quedando con las limitaciones de la NZDSF. Estas limitaciones deben ser tratadas, y se estudian más abajo. Recientemente, se han realizado unos pocos experimentos de laboratorio a cerca de 1.580 nm. Estos experimentos requieren el desarrollo de nuevos amplificadores ópticos, pero este método aparece como la solución más factible para mejorar los enlaces instalados basados en la DSF.

Entre los tres métodos indicados arriba, los seleccionados afectarán definitivamente al diseño del transmisor, a los filtros y posiblemente a los repetidores en línea. Las limitaciones físicas involucradas son específicas a la DSF y el sistema tendrá que ser diseñado de acuerdo con esto.

Ahora consideraremos infraestructuras basadas en la SMF, lo cual está lejos de las fibras más comúnmente usadas en las infraestructuras existentes. La principal limitación de la SMF se origina en su alta GVD (17 ps/nm.km. a 1.550 nm), por lo que es necesaria una técnica para la compensación de la dispersión. El principio básico es utilizar dispositivos con una GVD de signo opuesto al de la fibra. Estos dispositivos incluyen mallas reticulares Bragg, las cuales añaden un retraso que depende de la longitud de onda; pueden ser de banda ancha (para compensar a todos los canales simultáneamente) o una serie de mallas reticulares de banda estrecha (una por cada canal). Aunque prometedoras, las mallas reticulares Bragg aún no han mostrado su eficiencia como compensadores de GVD en sistemas WDM de 10 Gbit/s y, por tanto, no puede considerarse como una tecnología madura.

Otra opción es la fibra de compensación de la dispersión (DCF). Esta fibra tiene una dispersión alta (típicamente de 80 a 100 ps/nm.km), de esta

forma solamente en una longitud de una quinta parte de la SMF se compensa totalmente la GVD acumulativa sobre la línea de transmisión. La DCF generalmente se suministra en módulos correspondientes a una cantidad dada de GVD para la instalación en las posiciones del terminal y del repetidor. Como sus pérdidas son equitativamente altas (típicamente 0,6 dB/km), se debe ajustar el presupuesto de energía para mantener SNRs aceptables al final de la línea. Hay que hacer notar que normalmente no es posible suministrar compensación GVD idéntica para todos los canales en un multiplex grande, ya que la propia dispersión depende de la longitud de onda (ver **Figura 2**). Esta dependencia, que se caracteriza por la pendiente de dispersión D' , se refiere como una dispersión de tercer orden. De esta forma, para transmitir multiplexadores que se extienden a varias decenas de nanómetros, los módulos DCF no sólo compensarían idealmente el GVD de la SMF, sino también su pendiente, la cual tiene un signo positivo. Para evitar este problema, algunos DCFs comerciales disponibles muestran una pendiente negativa, la cual es suficientemente alta para cancelar completamente la dispersión de tercer orden.

Cuando se utiliza la gestión de la dispersión, se pueden alcanzar distancias de 500 km. y más, pero las no linealidades Kerr en la SMF y en la DCF tiene interacción con la GVD local para distorsionar los impulsos ópticos, perjudicando así el rendimiento de la transmisión. Con respecto a esto, la DCF no es favorable ya que tiene un coeficiente no lineal más alto y un área efectiva más baja. Es importante tener en cuenta que, como resultado del efecto Kerr, la compensación de dispersión perfecta no hace posible la transmisión ilimitada, sin hacer caso de cualquiera de las consideraciones de ruido de amplificador. En particular, la posición de los módulos de compensación GVD, los cuales forman parte del llamado mapa de dispersión, afecta fuertemente al rendimiento de la transmisión, el cual aumenta con la velocidad binaria.

La eficiencia de la gestión de la dispersión se ilustra en un experimento de transmisión de 32x10 Gbit/s sobre 500 km. de SMF, utilizando sólo tres amplificadores ópticos de ganancia plana en línea [7]. La **Figura 4** muestra un esquema de la preparación. El transmisor WDM está formado por 32 láseres de onda continua con longitudes de onda que van de 1535.04 nm a 1559.76 nm (indicados como canales 1 a 32) con una separación de frecuencia de 100 GHz. En la salida del transmisor, la potencia del canal se estimula a +5 dBm. La línea de transmisión está formada por cuatro tramos largos de SMF de 125 km. separados por amplificadores diseñados para liberar una ganancia plana (30 dB) dentro de un ancho de banda de 25 nm. La **Figura 4** también muestra el espectro óptico en la salida del transmisor y en la entrada del receptor. Los mínimos SNRs (con una resolución de ancho de banda 0,1 nm) son de 28 dB en la salida del amplificador impulsor y de 22,5 dB en la entrada del receptor.

La compensación de la dispersión se alcanza incorporando secciones de DCF en los amplificadores, utilizando una configuración especial de dos etapas para minimizar el impacto de la pérdida en la DCF sobre la SNR. Las DCFs tienen una dispersión media de 80 ps/nm.km a 1.550 nm, una pendiente de dispersión de entre 0,126 y +0,085 ps/nm². km y una atenuación de entre 0.39 y 0.56 dB/km. El mapa de dispersión para los canales 1, 17 y 32 se muestra en la **Figura 5**. Las simulaciones numéricas mostraron que este mapa proporciona un buen rendimiento de transmisión para todos los 32 canales. El efecto de la pendiente de dispersión puede verse claramente a partir de la separación de las tres líneas, que corresponden a los tres canales considerados.

En este experimento se consideraron dos configuraciones:

- (a) una DCF no adicional en el receptor
- (b) una sección de 9 km. adicional de la DCF introducida en la mitad de la longitud de onda más larga del multiplex.

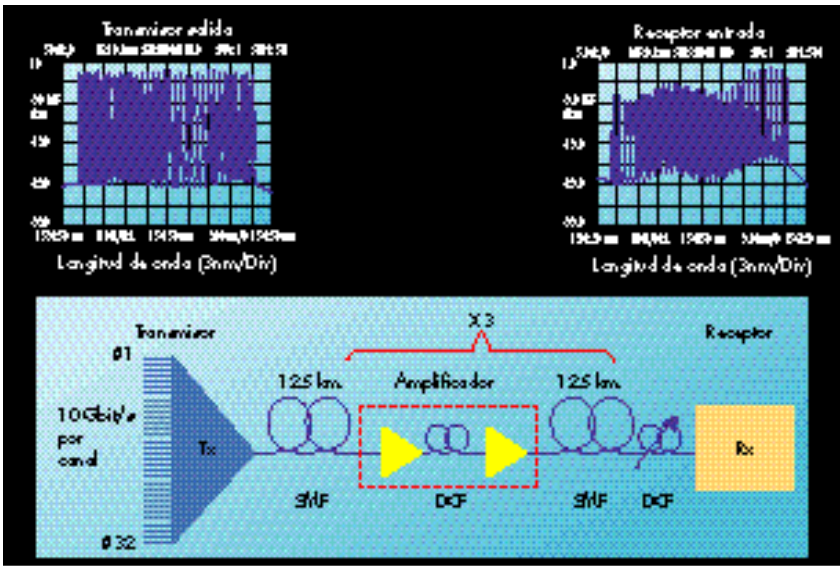


Figura 4 - Preparación del experimento de transmisión de 320 Gbit/s.

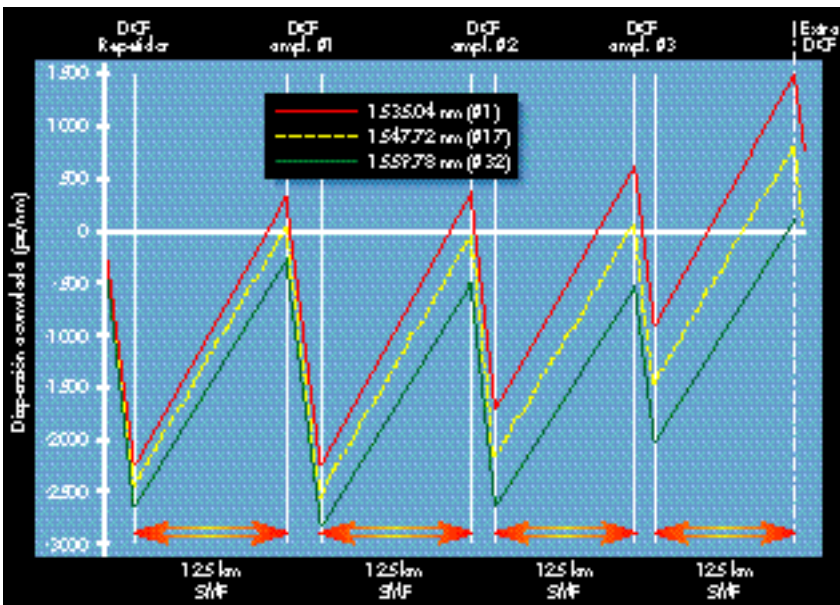


Figura 5 - Mapa de dispersión utilizado en el experimento de transmisión de 320 Gbit/s.

Se puede obtener buen rendimiento en todos los canales sin ajuste específico de canal, como se demostró en la transmisión a 320 Gbit/s. No obstante, cuando la DCF se inserta antes que el receptor se obtiene una clara mejora, como se muestra en la configuración (b). La **Figura 6** muestra los diagramas en ojo para los canales 17 y 32 en 0 km. como referencia, y para las configuraciones (a) y (b) después de 500 km. Se puede ver que, en el caso del canal 17, no hay cambios substanciales entre las configuraciones (a) y

(b), mientras que hay una mejora evidente para el canal 32.

Este experimento muestra como de ineludible y, sin embargo efectiva, puede ser la gestión de la dispersión cuando se mejoran infraestructuras basadas en la SMF. No obstante, con esta técnica es necesario tener en cuenta la pérdida introducida por los módulos de compensación y, por tanto, el mapa de dispersión, cuando se construye el sistema. El diseño del transmisor, del receptor y de los repetidores depende en gran medida de ello.

El último tipo de fibra a investigar es la NZDSF. La **Figura 3** mostró que la NZDSF no podría utilizarse como un elemento de caja negra a 10 Gbit/s. Esta figura también muestra que los canales más fuertemente penalizados son los que experimentan la dispersión más alta (números altos de canal para la NZDSF+; números bajos de canal para la NZDSF-). Esto sugiere que aunque estas infraestructuras tienen una GVD baja, la cual es no obstante demasiado alta, la gestión de la dispersión podría mejorar significativamente la calidad de la transmisión. A continuación, simulamos la transmisión a 320 Gbit/s sobre 5.100 km. utilizando esta técnica y comparamos los resultados con los obtenidos utilizando la SMF.

Investigamos tres configuraciones involucradas:

- Fibras de transmisión NZDSF+ (con fibras de compensación DCF)
- Fibras de transmisión NZDSF (con fibras de compensación SMF)
- Fibras NZDSF+ y NZDSF sobre tramos alternativos.

Los parámetros de la fibra se muestran en la **Tabla 1**, los cuales están relacionados con las fibras de primera generación NZDSF más comunes. La línea de transmisión es como la que se describe en la simulación de arriba, con la diferencia de que los amplificadores sin ruido incorporan cantidades graduables de fibra compensada. Se realizó un análisis sistemático de los mapas de dispersión que utilizan estas configuraciones basado en cuatro variables: la dispersión residual, y las cantidades de compensación de la dispersión en el transmisor, en el receptor y en los repetidores. En cada caso, la potencia óptica por canal variaba en el rango de 5 a 11 dBm, dando un total de alrededor de mil simulaciones.

Las principales conclusiones de este estudio son que, en las tres configuraciones, el mejor rendimiento de los mapas de dispersión siempre incluye una cantidad significativa de la compensación en línea. Esto previene la destrucción irrecuperable de impulsos

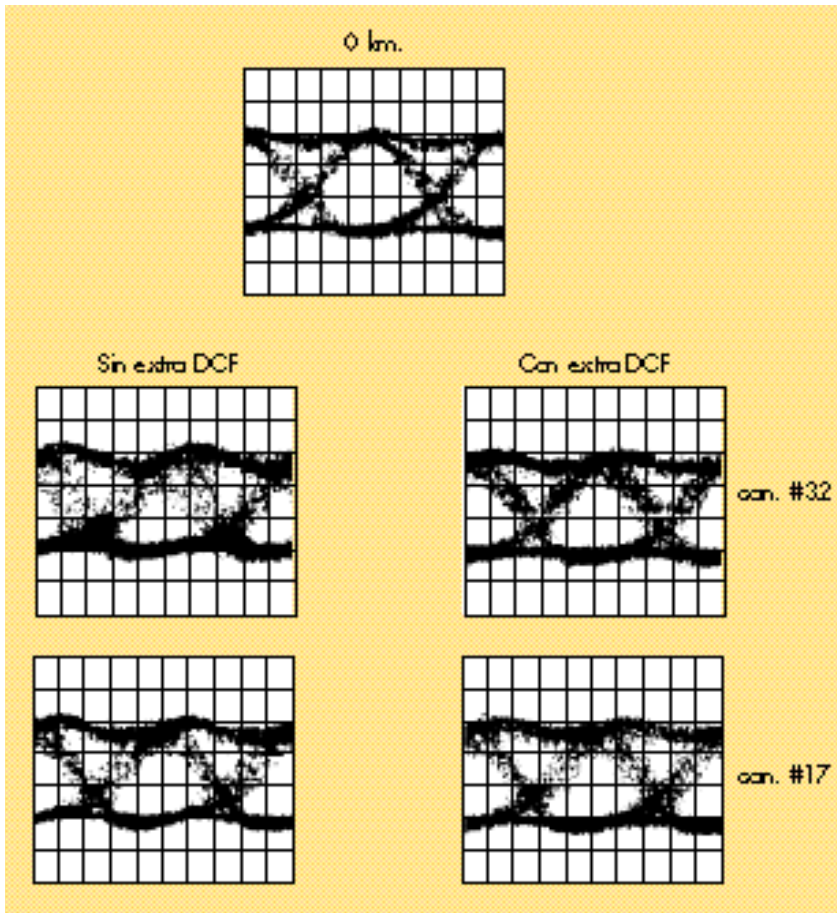


Figura 6 - Diagramas en ojo a 0 km y 500 km, con y sin DCF extra en el receptor para la mitad de la longitud de onda más larga del múltiplex.

cuando se acumula una excesiva dispersión a lo largo del enlace. De esta forma, mapas que confían únicamente en la pre o post-compensación nunca suministran un rendimiento óptimo de transmisión. Otra conclusión es que la dispersión residual óptima es distinta de cero y depende de la fibra. Por último, se encuentra que la tolerancia de los mapas a los efectos Kerr debe ser mejorada cuando la NZDSF+ y la NZDSF se utilizan como tramos alternativos. En efecto, alternando la NZDSF se suministra una compensación en línea inherente, así no hay necesidad de fibra compensada en los amplificadores en línea. En consecuencia, la longitud total de la fibra y, por tanto, los perjuicios no lineales acumulativos, son también más bajos.

La **Figura 7** muestra la penalización del sistema como una función de número de canal con potencia de +7

dBm por canal, obtenido con el mapa con mejor rendimiento, involucrando alternativamente NZDSF+/NZDSF con pre y post-compensación. Como en la **Figura 3**, las penalizaciones se han evaluado con y sin interacciones WDM entre canales. En la configuración multicanal auténtica, se ve que el rendimiento supone una clara mejora comparado con el esquema no compensado de NZDSF de la **Figura 3**, mostrando la eficiencia de la técnica de gestión de la dispersión. No obstante, el impacto de las no linealidades cruzadas es elevado.

Para comparar, se hizo simultáneamente un estudio sistemático de la gestión de la dispersión con la SMF sobre la misma línea de transmisión. Los resultados del mapa con mejor rendimiento se muestran en la **Figura 7**. Las penalizaciones de canal simple son muy similares sobre la SMF y la

NZDSF. No obstante, cuando se toman en cuenta las no linealidades cruzadas, la transmisión sobre la NZDSF da lugar a penalizaciones significativamente más altas. Varios factores pueden explicar este resultado. En particular, la NZDSF de primera generación tiene un área efectiva más pequeña ($55 \mu\text{m}^2$) que la de la SMF ($80 \mu\text{m}^2$). Además, los fenómenos de limitación relacionados con la WDM, principalmente XPM y FWM, se reducen fuertemente cuando la dispersión local es alta, como es el caso de la SMF.

Resumiendo, los sistemas basados en SMF están limitados principalmente por la no linealidad de canal simple, lo cual se mantiene en la verificación de la gestión apropiada de la dispersión. Por contra, los sistemas que utilizan la NZDSF están limitados principalmente por no linealidades cruzadas, las cuales son significativamente más difíciles de evitar. Esto sugiere que el primer tipo de sistema es más flexible para la provisión de capacidades más altas, al añadir más canales y reducir la separación espectral.

■ Conclusión

Independientemente del tipo de fibra involucrada, la física de la propagación óptica ha llegado a ser un problema principal. Ninguna de las fibras disponibles ampliamente cumplen con todos los requisitos para una fácil mejora a los sistemas Terabit/s. Si se tienen que instalar nuevos tipos de fibras, se tienen que investigar fibras con áreas efectivas más grandes, con diferentes valores de GVD y/o con pendientes de dispersión bajas. No obstante, tales características mejoradas no se alcanzarían a costa de una atenuación alta.

Antes de recurrir a la instalación de nueva fibra, aunque se ha mejorado mucho, los operadores de red prefieren cancelar el coste de sus infraestructuras internas. La gestión de la dispersión, en particular, ofrece unos medios muy eficientes para mejorar sistemas basados en la SMF, y también se necesitan usar en la NZDSF. En todos los casos, los sistemas de alta ca-

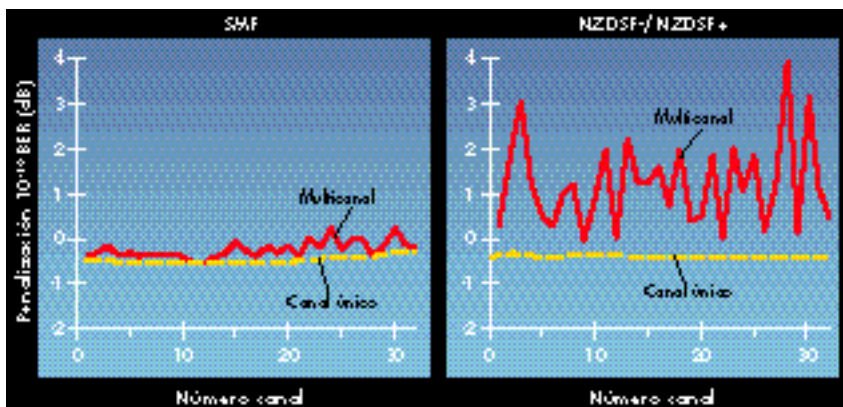


Figura 7 - Rendimiento de la transmisión simulada de un múltiplex de 32x10 Gbit/s sobre SMF o NZDSF+/NZDSF- alternadas con gestión de la dispersión óptima.

pacidad no se pueden diseñar sin un preciso conocimiento de las características físicas de la fibra a conectar.

■ Referencias

- 1 "Performance of the Telecommunications Sector up to 2010 under Different Regulatory and Market Options", *Analysis Publications*, febrero 1992.
- 2 "Synchronous Digital Hierarchy", ITU-T, *Recomendaciones G.707, G.708, y G.709*, Ginebra, Suiza, 1988.
- 3 A. Jourdan, M. Chbat, P.A.Perrier, J-L.Beylat: "Field Trials of All-Optical Networking Based on Wavelength Conversion", *Revista de Telecomunicaciones de Alcatel*, 3^{er} trimestre 1998, págs. 218-224.
- 4 J. Adler, R. Castelli, T.Krause: "Market Trends and Evolution for Optical Transmission Systems", *Revista de Telecomunicaciones de Alcatel*, 3^{er} trimestre 1998, págs. 165-175.
- 5 A.R. Chraplyvy: "Limitations on Lightwave Communications Imposed by Optical-Fiber Nonlinearities", *Journal of Lightwave Technology*, volumen 8, pág. 1548, 1990.
- 6 F. Forghieri, R.W. Tkach, A.R. Chraplyvy, D. Marcuse: "Reduction of Four-Wave Mixing Crosstalk in WDM Systems Using Unequally-Spaced Channels", *IEEE Photon. Technology Letters*, volumen 6, págs. 754-756, junio 1994.
- 7 S. Bigo, A. Bertaina, M.W.Chbat, S.Gurib, J.Da Loura, J-C.Jacquinot, J.Hervo, P.Bousselet, S.Borne, D.Bayart, L.Gasca, J-L.Beylat: "320 Gbit/s (3210 Gbit/s WDM) Transmission over 500 km of Conventional Single-Mode Fiber with 125 km Amplifier Spacing", *Proceedings of the 23rd European Conference on Optical Communications*, volumen 5, págs. 17-20, Edimburgo, septiembre 1997.

Alain Bertaina trabaja como ingeniero en la Unidad de Redes Fotónicas del Alcatel Alsthom Corporate Research Center en Marcoussis, Francia.

Jean-Luc Beylat es jefe de la Unidad de Redes Fotónicas y Director de proyecto de Redes y Sistemas Ópticos en el Alcatel Alsthom Corporate Research Center de Marcoussis, Francia.

Sébastien Bigo está a cargo de las técnicas de transmisión WDM en la Unidad de Redes Fotónicas de Alcatel Alsthom Corporate Research Center en Marcoussis, Francia.

Michel W. Chbat fue jefe del Advanced Terrestrial Transmission Research Group dentro de la Photonic Networks Unit del Alcatel Corporate Research Center en Marcoussis, Francia. Ahora, es director de producto para tecnologías avanzadas en Alcatel Network Systems, Richardson, Texas, EE.UU.

PRUEBAS DE CAMPO DE REDES ÓPTICAS BASADAS EN CONVERSIÓN DE LONGITUD DE ONDA

J-L. BEYLAT
M.W. CHBAT
A. JOURDAN
P.A. PERRIER

Recientes pruebas de campo de redes ópticas basadas en la conversión de longitud de onda han confirmado la promesa de esta técnica.

■ Introducción

El gran crecimiento previsto del tráfico asociado con las nuevas aplicaciones tales como los servicios on-line, la telefonía móvil y los futuros servicios multimedia, ya se está haciendo realidad. A su vez, la nueva situación está disparando un crecimiento proporcional en los requisitos de capacidad de las redes de transmisión de medio y largo alcance. Para satisfacer esta demanda, la capacidad de los sistemas de transmisión punto-a-punto se está

aumentando, muy significativamente, con la introducción de la WDM (multiplexación por división de la longitud de onda). Recientes anuncios de productos proponen capacidades por fibra de más de 100 Gbit/s divididos sobre 64 longitudes de onda.

Sin embargo, las funciones de enrutamiento como la multiplexación de inserción/extracción y la transconexión, aún se realizan a una velocidad relativamente baja, 155 Mbit/s del SDH/SONET (jerarquía digital síncrona/Synchronous Optical Network), lo

que hace que el número, tamaño y, por tanto, el coste de los nodos de enrutamiento sea bastante irreal si la prevista transmisión sub-terabit/s se desplegara en toda la red. Para evitar una explosión en el coste del enrutamiento, es esencial introducir una nueva capa que pueda enrutar señales de alta velocidad (típicamente de 2,5 ó 10 Gbit/s) para configuración y restauración. La fotónica, y especialmente el WDM, que emplea la dimensión de la longitud de onda, es un fuerte candidato para la implementación de esta capa, que debería ser independiente de las capas electrónicas cliente, como se muestra en la **Figura 1** [1].

Se requiere una serie de nuevos elementos de red para crear una red óptica; se basan más o menos en sus equivalentes electrónicos y se adaptan a lo específico de la óptica. Alcatel está realizando la investigación y el desarrollo de un conjunto de dichos elementos de red, que incluyen [2]:

- OADMs (multiplexores ópticos de inserción/extracción) fijos y semi-flexibles, que proporcionan acceso permanente y controlable a una o unas pocas longitudes de onda transmitidas.
- FXCs (transconectores ópticos de fibra), que podrían ser usados para aprovisionamiento automático de las fibras y restauración de red.
- OXCs (transconectores ópticos de longitud de onda) para enrutamiento del nivel de longitud de onda. La traducción de longitud de

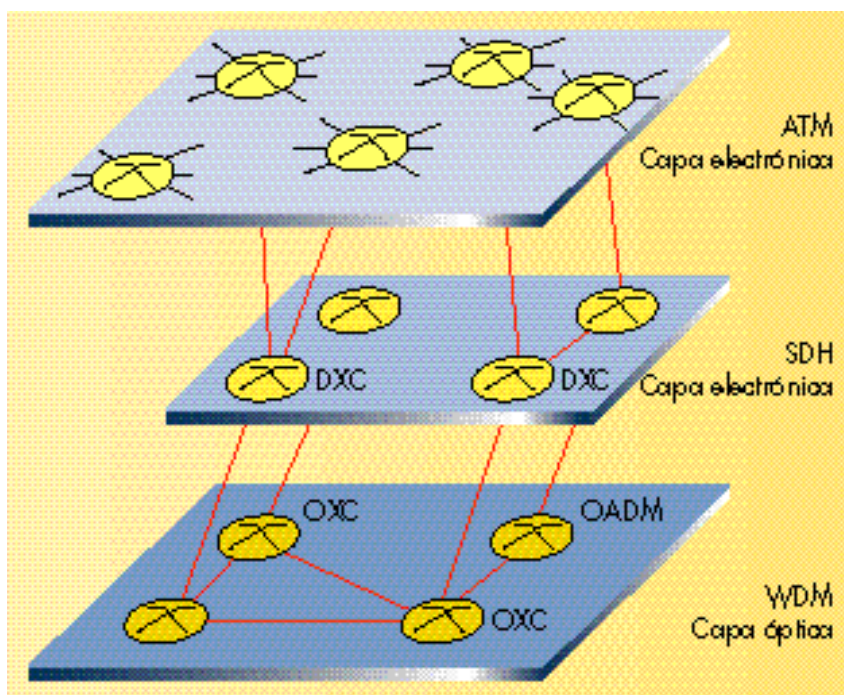


Figura 1 - Arquitectura estratificada de la red de transporte.

onda es una facilidad adicional de tales sistemas, que los hace estrictamente sin bloqueo.

Estos elementos de red se basan en una serie de tecnologías ópticas de áreas tales como la conmutación espacial, el filtrado y enrutamiento de longitud de onda, y la traducción de longitud de onda, en las que Alcatel ha alcanzado resultados significativos [3].

La madurez de algunas de estas tecnologías ha llevado a que el centro de investigación de Alcatel coordine un consorcio europeo dentro del marco del programa de investigación ACTS (Advanced Communications Technologies and Services) para probar la factibilidad de sistemas y redes ópticas a gran escala, tanto en el laboratorio como en el campo de aplicación.

■ Proyecto OPEN del ACTS

El consorcio OPEN (red óptica paneuropea) del ACTS consta de representantes de cinco operadores europeos: FT-CNET de Francia, Belgacom de Bélgica, Telenor de Noruega, Teledanmark de Dinamarca, y CSELT de Italia. Además, hay un fabricante de equipos (Alcatel) y cinco universidades europeas: Universidad de Essex (Reino Unido), Universidad Técnica de Dinamarca, Universidad de Gante (Bélgica), ETH-Zurich de Suiza, y Sintef Delab, de Noruega. El proyecto se inició en septiembre de 1995 y está previsto que dure tres años.

La red óptica paneuropea está diseñada para interconectar importantes ciudades del continente mediante una malla de fibras ópticas de alta capacidad transconectadas en nodos fotónicos transparentes, empleando masivamente el WDM, tanto para transmisión como para enrutamiento [4]. La velocidad mínima soportada por esta red sería de 2,5 Gbit/s (STM-16/OC-48). El principal elemento de la red que se está estudiando para que cumpla este concepto es un WT-OXC (transconector óptico traductor de longitud de onda) estrictamente sin bloqueo, basado en una tecnología completamente óptica. Además de las

numerosas actividades de laboratorio, el concepto se está probando implantándolo en un prototipo de red que se probará en dos configuraciones de campo en las redes de los operadores participantes.

■ Arquitectura del WT-OXC

La **Figura 2** muestra la arquitectura del nodo WT-OXC seleccionado para la implantación y las pruebas de campo. La arquitectura es del tipo broadcast-and-select, que significa que las longitudes de onda entrantes se difunden a todos los puertos de salida, cada uno de los cuales selecciona la apropiada longitud de onda de entrada. Sus principales ventajas son su inherente adaptabilidad a aplicaciones multidistribución, y el hecho que no requiere un transmisor sintonizable, ya que no es aún una tecnología muy madura. Esta arquitectura también minimiza el tamaño de los conmutadores espaciales.

La conmutación se realiza en tres etapas seguidas:

- Etapa de conmutación espacial: donde todo el agrupamiento de lon-

gitudes de onda de las fibras de entrada significativas se seleccionan de acuerdo a la tabla de enrutamiento reconfigurable de los puertos de salida,

- Etapa de selección de longitud de onda: donde se extrae la longitud de onda apropiada entre las otras, de acuerdo a la tabla de enrutamiento reconfigurable,
- Etapa de traducción de longitud de onda: donde la longitud de onda no especificada del puerto de entrada relevante se convierte sistemáticamente a la longitud de onda reservada en la fibra de salida para un puerto de salida dado.

El empleo sistemático de los traductores de longitud de onda afecta a las prestaciones del nodo de diferentes formas:

- Como la conectividad es mayor que en los transconectores sin traducción de longitud de onda (ya que todas las longitudes de onda de entrada se pueden conectar a todas las longitudes de onda de salida), existe un coste adicional asociado con el mayor número de elementos de conmutación.

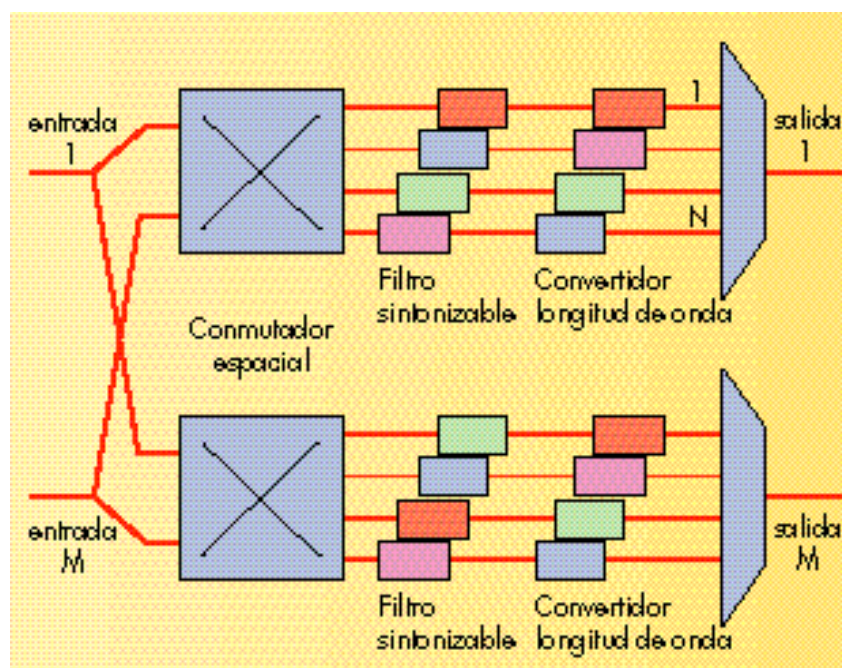


Figura 2 - Arquitectura de difusión y selección del WT-OXC.

- La traducción de longitud de onda emplea una arquitectura estrictamente sin bloqueo, por lo que se optimiza la utilización de los recursos (del 10 al 30% de ganancia, dependiendo de la conectividad de red, esquema de protección y matriz de tráfico) y se facilita la asignación de recursos y la escalabilidad de la red.
- La regeneración parcial de la señal asociada con el proceso de conversión de longitud de onda mejora la prestación física del nodo, y hasta cuánto se puede ampliar la red.

Se han elegido avanzados componentes desarrollados por el Centro de Investigación de Alcatel basados en tecnología SOA (amplificador óptico de semiconductores InP) para implantar el prototipo WT-OXC del proyecto OPEN. En particular, la etapa de conmutación espacial se basa en puertas ópticas diseñadas para operación multi-longitud de onda; se integran en arrays de cuatro puertas por módulo [3].

Los conversores de longitud de onda ópticos, basados en efectos de depleción de portadora en los SOAs integrados en la configuración interferométrica, se han utilizado para la etapa de traducción de longitud de onda [3]. Estos dispositivos presentan propiedades de conformado de onda parcial de amplitud de pulso que mejora la robustez y cascabilidad del sistema frente a la acumulación del ruido.

■ Dimensiones del Último WT-OXC Completamente Óptico

Antes de definir un prototipo para las pruebas de campo del proyecto OPEN, se realizaron una serie de actividades experimentales y de modelado de laboratorio para evaluar las prestaciones de la arquitectura WT-OXC y de la tecnología InP. La cascabilidad requerida por tales sistemas y su compatibilidad con las grandes distancias de transmisión para crear grandes redes también debe ser tenida en cuenta.

La **Tabla 1** muestra los resultados del modelado que indican el número

máximo de OXCs que se pueden poner en cascada, mientras se mantiene el BER (tasa binaria de errores) necesario, relativo al tamaño de estos transconectores para una velocidad de canal de 2,5 Gbit/s. Una longitud de 320 km. de la fibra óptica terrestre más usada (Recomendación G.652) se inserta entre los transconectores; la gestión de dispersión cromática se basa en la utilización del DCF (fibra que compensa la dispersión). Las prestaciones del WT-OXC se comparan con las de un transconector convencional, que sólo proporciona enrutamiento de longitud de onda sin traducción de longitud de onda.

La **Tabla 1** resalta la importancia de las propiedades de conformado de onda de un convertidor de longitud de onda totalmente óptico. Sin conformado de onda, la capacidad del nodo en condiciones reales de la red debería limitarse a menos de 100 Gbit/s, principalmente como resultado de la acumulación del ruido en los sistemas de enrutamiento y transmisión. Con conformado de onda, las prestaciones del nodo son independientes de la capacidad hasta niveles que se aproximan a 1 Tbit/s.

Estos resultados de modelado tienen que confirmarse experimentalmente, como se ejemplifica en la **Figura 3** que muestra la calidad de la señal medida tras una cascada experimental de cuatro WT-OXCs separados por 320km. de

fibra G.652 para diferentes capacidades del nodo. No se ha observado ninguna evolución significativa hasta una capacidad de nodo de 640 Gbit/s.

■ Implantación y Prestaciones del Prototipo de un WT-OXC

Estos resultados tan atractivos se tienen que confirmar en pruebas de campo. Un prototipo de WT-OXC se montó en el Centro de Investigación Corporativa de Alcatel. Este prototipo es representativo de un sistema con cuatro puertos de entrada/salida con cuatro longitudes de onda por puerto y una capacidad de 2,5 Gbit/s por longitud de onda. Sin embargo, está subequipado de acuerdo con las necesidades de las pruebas y entra en un bastidor del equipo (**Figura 4**). Incorpora facilidades de inserción/extracción.

Se implantó también la protección del equipo compartido mediante un trayecto de tránsito de reserva a través del WT-OXC sintonizado a una longitud de onda de reserva diferente entre cualquiera de las cuatro longitudes de onda utilizadas en los multiplex de trabajo. Así, en el caso de un fallo de cualquier placa en el transconector (por ejemplo, conmutador, filtro, convertidor de longitud de onda), se puede usar un trayecto de reserva a una

Tamaño del transconector (capacidad)	Número de nodos en cascada	
	Transconector de traducción de longitud de onda	Transconector de enrutamiento de longitud de onda
4 × 4, 4 longitudes de onda (40 Gbit/s)	20	12
8 × 8, 8 longitudes de onda (160 Gbit/s)	20	5
16 × 16, 16 longitudes de onda (640 Gbit/s)	20	3
32 × 32, 32 longitudes de onda (2 Tbit/s)	2	2

Tabla 1 - Número máximo de cascadas de transconectores para diferentes capacidades a una velocidad de canal de 2,5 Gbit/s.

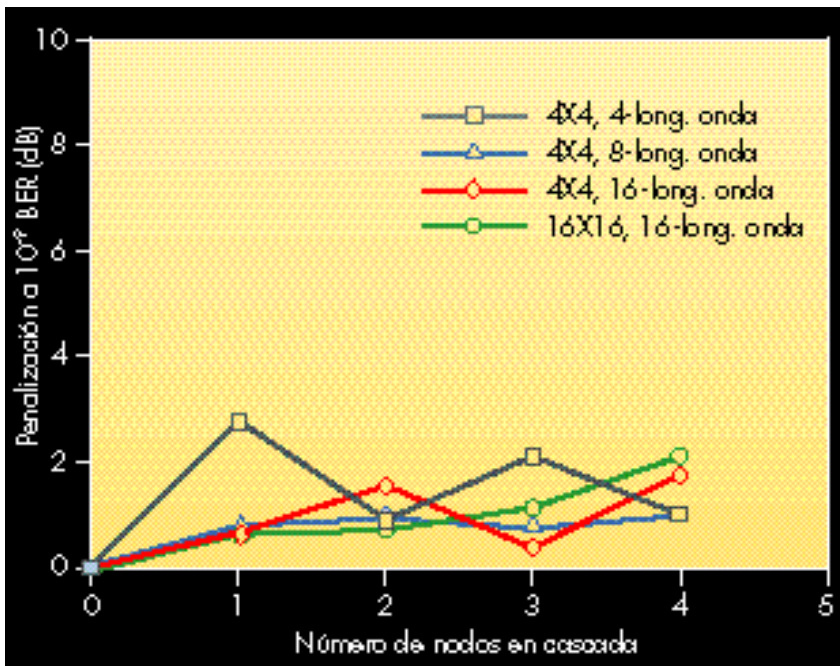


Figura 3 - Cascada experimental de WT-OXC's para diferentes capacidades de nodo a una velocidad de canal de 2,5 Gbit/s.

longitud de onda diferente para asegurar la continuidad del servicio.

El prototipo incluye facilidades para supervisar el estado del transconector. En particular, una placa de supervisión compartida por todos los puertos de entrada y salida proporciona información sobre la longitud de onda, potencia y relación óptica señal-ruido en cada canal. Un LEM (gestor de elemento de red) controla y supervisa las diferentes placas, así como la interfaz con el NM (gestor de red) que ha sido implantado por los operadores de red que participan en el proyecto OPEN. Aunque aún no cumple con las normas TMN (Red de Gestión de las Telecomunicaciones), esta interfaz soporta las funciones de gestión de configuración, detección de fallos y supervisión de las prestaciones.

Las primeras evaluaciones de laboratorio del prototipo han probado las buenas prestaciones de esta tecnología. Las pruebas de diferentes configuraciones en términos de distancias de transmisión y número de transconectores en cascada, utilizando largas secuencias binarias pseudoaleatorias, muestran que la penalización de la sensibilidad de detección en todas las configuraciones probadas fue de unos

1,5 dB con un BER de 10-10, indicando que la calidad de la señal era más o

menos independiente del número de cascadas en el nodo. Además, se han registrado BERs mejores de 10-12.

Se encontraron también tolerancias a las variaciones de la señal de entrada para cumplir las especificaciones: una variación de la potencia de entrada de más de 6dB fue fácilmente tolerada por el WT-OXC, asegurando así alguna flexibilidad respecto a las condiciones de campo. Gracias a las facilidades de conformado de onda de los convertidores de longitud de onda ópticos, se toleraron pobres relaciones ópticas señal-ruido sin una degradación de las prestaciones, incluso en funcionamiento en cascada (por debajo de los 13 dB en 1 nm, compatible con la infraestructura de campo).

■ Pruebas de Campo de OPEN

Las pruebas de campo se diseñaron para probar que el concepto OPEN de una red de transporte completamente



Figura 4 - Placa de conversión de longitud de onda y WT-OXC montado en bastidor.

óptica es aplicable a las diferentes infraestructuras de fibra existentes, en términos de edad, atenuación, espaciamientos de amplificadores y tipo de fibra (G.652 y G.653). Además, las pruebas de campo difirieron ligeramente en términos de tipo de tráfico (tramas SDH o pseudoaleatorio) y sistema de gestión (velocidad, demostración rápida de restauración). Sin embargo, el mismo equipo (WT-OXC y amplificadores de línea) se usó en ambas pruebas.

La primera prueba de campo tuvo lugar entre Noruega y Dinamarca utilizando las infraestructuras proporcionadas por Telenor y Teledanmark; la segunda prueba unió Francia y Bélgica utilizando las infraestructuras de France Telecom y Belgacom.

■ Prueba de Campo Noruega-Dinamarca

Configuración

La primera prueba de campo se planificó para finales de 1997 y uniría Oslo en Noruega con Thisted en Dinamarca, a través de una combinación de cables ópticos terrestres y submarinos, como se muestra en la **Figura 5**.

Un terminal de línea WDM en Oslo genera tráfico pseudoaleatorio a 2,5 Gbit/s sobre cuatro canales. Alimenta una línea de transmisión G.652 de 350 km. hasta Arendal, donde está situado el prototipo WT-OXC. Arendal está unido a la costa danesa a través de dos rutas alternativas, cruzando cada una de ellas el mar sobre un cable sin repetidores de 140 km. fabricado con fibra de dispersión desplazada (G.653). En la ruta oriental, se insertó en Hjørring un multiplexor óptico de inserción/extracción, donde acaba el cable submarino para supervisión. Hjørring se une, a su vez, con Thisted por 180 km. de fibra terrestre G.652. En la ruta occidental, se equipó un enlace de retorno a Arendal desde Kristiansand para demostrar la cascada WT-OXC. La dispersión cromática de la fibra terrestre se compensaba parcialmente (sobre el 40%) utilizando fibra que

compensa la dispersión. Sin embargo, esta fibra era de una generación bastante antigua con una atenuación media bastante alta, y el espaciado medio entre amplificadores era bastante grande (83 km.). Consecuentemente, se requerían grandes ganancias de amplificadores. El equipo en Oslo, Hjørring y Thisted fue suministrado por los operadores escandinavos. Toda la red se controlaba por un sistema de gestión de red centralizado, que fue usado para crear las diferentes confi-

guraciones y medir las prestaciones del sistema.

Resultados

Se probaron seis importantes configuraciones de red, presentando distancias de transmisión de hasta 1.000 km. en fibras combinadas terrestres/submarinas, y cascadas de uno a tres WT-OXCs. La calidad de transmisión fue establecida en Thisted, utilizando medidas lineales del factor Q basadas en

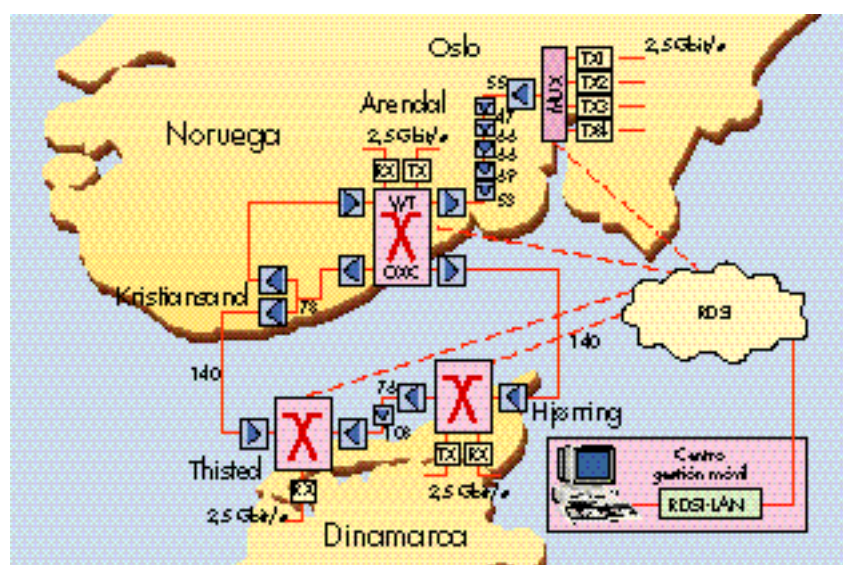


Figura 5 - Esquema de la prueba de campo Noruega-Dinamarca.

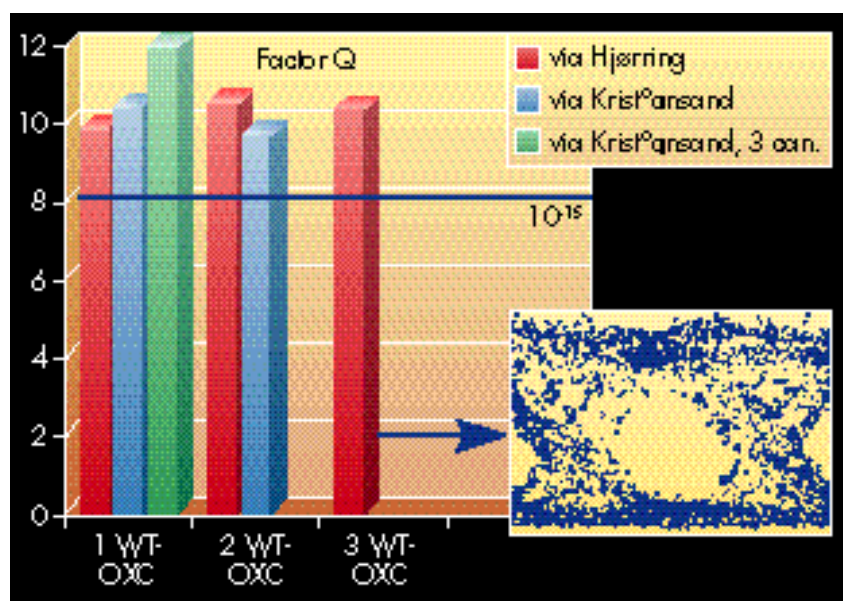


Figura 6 - Medidas del factor Q obtenidas en las seis configuraciones de prueba Noruega-Dinamarca, con una cascada de hasta tres WT-OXCs sobre distancias de hasta 1.009 km.

evaluaciones del BER. En estas seis configuraciones, los factores Q van de 9,7 a 12 (**Figura 6**, [5]), garantizándose así una excelente calidad de transmisión (en principio bien por debajo de 10-15). Las medidas reales, que se limitaron en duración, probaron que el BER era mejor que 10-11. Aunque las longitudes de onda elegidas estaban cerca de la longitud de onda sin dispersión de los cables submarinos, no se observó ninguna penalización en la mezcla de las cuatro ondas resultante sobre dichos enlaces debido al espaciado de canal relativamente grande (400 GHz).

Además, las evaluaciones tras la prueba han mostrado que la avanzada tecnología de semiconductores del WT-OXC no se ha degradado en un período de seis meses, tanto en condiciones de campo como de laboratorio, probando así su fiabilidad.

■ Prueba de Campo Francia-Bélgica

Configuración

La segunda prueba de campo une París, en Francia, con Bruselas, en Bélgica, utilizando las infraestructuras de cable terrestre (G.652) de France Telecom y Belgacom. La **Figura 7** muestra la configuración de prueba.

Un terminal de cuatro longitudes de onda en París alimenta un enlace de transmisión de 150 km. con Amiens, donde se encuentra un conmutador de fibras de barras cruzadas 2x2. El WT-OXC se localiza en Lille, y el transconector optomecánico 2x1 está en Bruselas. Se ha equipado una topología de transmisión triangular para demostrar las facilidades de restauración y las configuraciones de bucle en torno al nodo de Lille. El perímetro de este triángulo es de unos 450 km. Aunque el espaciado medio de los amplificadores es más pequeño que en la primera prueba de campo (64 km.) y la atenuación de la fibra inferior, la distancia entre los nodos es significativamente superior (hasta 450 km.) y las pérdidas relacio-

nadas con la compensación de la dispersión son más altas. Es posible, utilizando esta configuración, demostrar la cascada de hasta cuatro WT-OXCs, así como de dos transconectores optomecánicos y conmutadores de fibra, junto a la transmisión sobre una distancia máxima de unos 1.700 km. En esta prueba, los transmisores se alimentan con tramas STM-16; las prestaciones de BER se evalúan utilizando los octetos B del SDH.

De nuevo, ha sido desarrollado un sistema de gestión centralizado para la configuración del sistema y el análisis de las prestaciones. Sin embargo, además de la prueba anterior, se optimizó el software para probar la rápida (menos de 100 ms) restauración de la red en caso de un fallo simulado.

Resultados de la instalación

La prueba se montó en marzo de 1998. Tras numerosas pre-pruebas de la configuración de prueba en el laboratorio, se realizaron medidas iniciales de calidad sobre una serie de configu-

raciones durante el periodo de instalación, como se muestra en la **Figura 8**. Estas configuraciones incluían hasta cuatro WT-OXCs en cascada y una distancia total de transmisión de hasta 1.700km. Se midieron BERs inferiores a 10-12 durante este periodo.

■ Conclusión

El concepto de WT-OXCs totalmente ópticos, que proporcionen funciones de encaminamiento de servicio transparente sobre canales de alta velocidad, se ha estado estudiando durante los últimos años en el Centro de Investigación Corporativo de Alcatel. Se ha propuesto e implantado una arquitectura óptima usando tecnología avanzada totalmente óptica. La capacidad física para crear redes de tamaño y capacidad significativas basadas en dichos transconectores ha sido probada en estudios de laboratorio.

En el marco del proyecto europeo OPEN del ACTS, la estrecha cooperación con cuatro importantes operado-

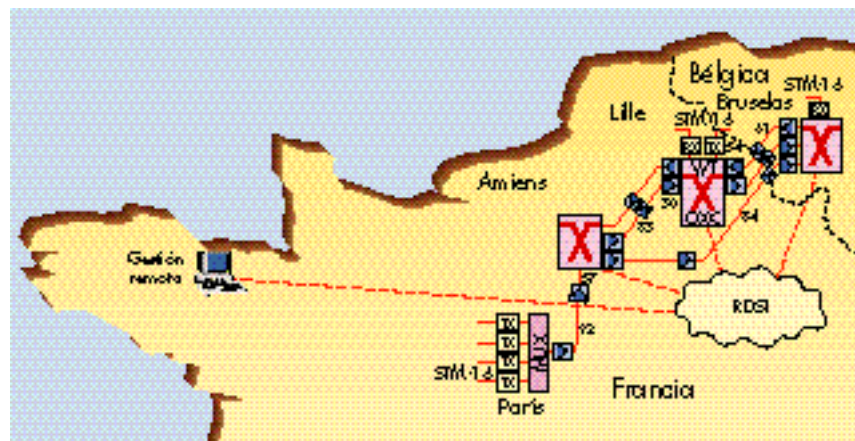


Figura 7 - Configuración de la prueba de campo Francia-Bélgica.

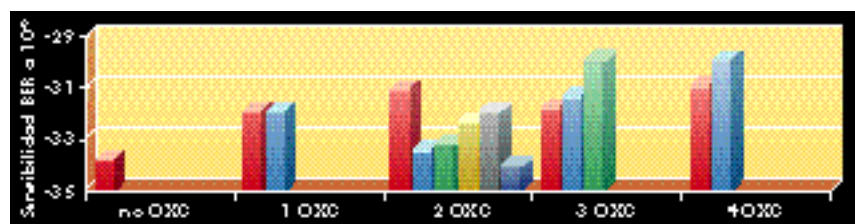


Figura 8 - Sensibilidad de detección con un BER de 10-9 para diferentes configuraciones de la prueba Francia-Bélgica.

res de redes europeos ha llevado a la definición y puesta en marcha de dos configuraciones de prueba, para probar la madurez de dichas tecnologías en este campo. Los resultados de la primera prueba y los primeros informes de la segunda tienden a confirmar esta madurez. Estos logros son especialmente más significativos en dichas pruebas ya que es la primera vez que se han probado los transconectores traductores de longitud de onda totalmente ópticos en condiciones reales.

A corto plazo, un sistema de gestión más sofisticado, que cumplirá con las normas TMN, se adaptará para trabajar con el prototipo WT-OXC. En 1999, está prevista una nueva prueba de campo, conjuntamente con France Telecom y Belgacom, formando parte de un nuevo proyecto del ACTS llamado PELICAN. La topología más compleja de esta prueba hará posible ir más allá de la validación física del concepto para demostrar funciones de gestión de red más ricas, en particular con respecto a las facilidades de restauración. Esta nueva prueba también incluirá pruebas físicas de las tecnologías a 10 Gbit/s.

Estas actividades están abriendo el camino a la introducción de las redes de transporte de alta capacidad, basadas en un tecnología óptica, para enfrentarse a la tremenda cantidad de tráfico generado por las nuevas aplicaciones multimedia.

■ Referencias

- 1 A. Fioretti y otros: "Application of Optical Transparency to the Telecommunications Core Networks", *Proceedings of the International Switching Symposium*, Berlín, Abril 1995, pág. 67.
- 2 A. Jourdan y otros: "Key Building Blocks for High-Capacity WDM Photonic Transport Networks", publicado en *Journal of Selected Areas in Communications*, número especial sobre High Capacity Transport Networks, mediados de 1998.
- 3 F. Brillout, F. Devaux, M. Renaut: "From Transmission to Processing: Challenges for New Optoelectronic Devices", *Revista de Telecomunicaciones de Alcatel*, 3^{er} trimestre 1998.
- 4 M. Chbat y otros: "Toward Wide-Scale All-Optical Transparent Networking: the ACTS Optical Pan-European Network (OPEN) Project", a publicar en *Journal of Selected Areas in Communications*, número especial High Capacity Transport Networks, mediados de 1998.
- 5 L. Berthelon y otros: "A Cross-Border WDM Networking Field Trial with All-Optical Wavelength-Translating

Crossconnects", *Technical Digest of Optical Fiber Communication (OFC) Conference*, 1998, paper PD26.

J-L. Beylat es Manager del Proyecto de Redes y Sistemas Ópticos en el Departamento CRC de Sistemas Ópticos y de la Unidad de Redes Fotónicas en el Centro de Investigación de Alcatel en Marcoussis, Francia.

Michel W. Chbat es Manager de Producto para Tecnologías Avanzadas en Alcatel Network Systems en Richardson, Texas, EE.UU.

Amaury Jourdan es el líder de un Grupo de Investigación sobre Sistemas de Conmutación y Enrutamiento Ópticos y Manager Adjunto de la Unidad de Redes Fotónicas en el Centro de Investigación de Alcatel Alsthom en Marcoussis, Francia.

P.A. Perrier es Manager de Producto para Transconectores de Fibra Óptica en la División de Sistemas de Transmisión de Alcatel Telecom en Richardson, Texas, EE.UU.

SOLUCIONES ÓPTICAS PARA LA RED DE ACCESO

G. EILENBERGER
 TH. PFEIFFER
 I. VAN DE VOORDE
 P. VETTER

Los laboratorios de investigación están desarrollando avanzadas tecnologías ópticas que ofrecen mayores capacidades y más alta flexibilidad en la red de acceso.

■ Introducción

La creciente demanda de servicios de banda ancha requerirá la introducción de tecnologías ópticas en la red de acceso. El ADSL (bucle de abonado digital asimétrico) y el módem de cable hacen posible un despliegue inicial de los servicios de banda ancha sin excesivas inversiones en infraestructura. En cualquier caso, es de esperar que la penetración de abonados y el ancho

de banda requerido en cada hogar crezcan gradualmente, excediendo más adelante las capacidades del ADSL y el módem de cable. En los hogares, a menudo, residen varios usuarios que se abonarán a una gran cesta de servicios y siempre desearán una mejor calidad.

La evolución de la red de acceso apunta a una provisión de servicios de banda ancha con un alcance superior a 150 km. Para salvar tales distancias, se

instalarán redes de alimentación ópticas, que utilizan una amplia gama de técnicas de multiplexación (TDMA, WDMA, CDMA) y también ofrecen nuevas funcionalidades en términos de enrutamiento y protección de multiplexación por división de la longitud de onda (WDM). Además, las técnicas ópticas avanzadas prometen ofrecer reducciones de coste a través de su mejorada fiabilidad, facilidad de gestión y mayor flexibilidad.

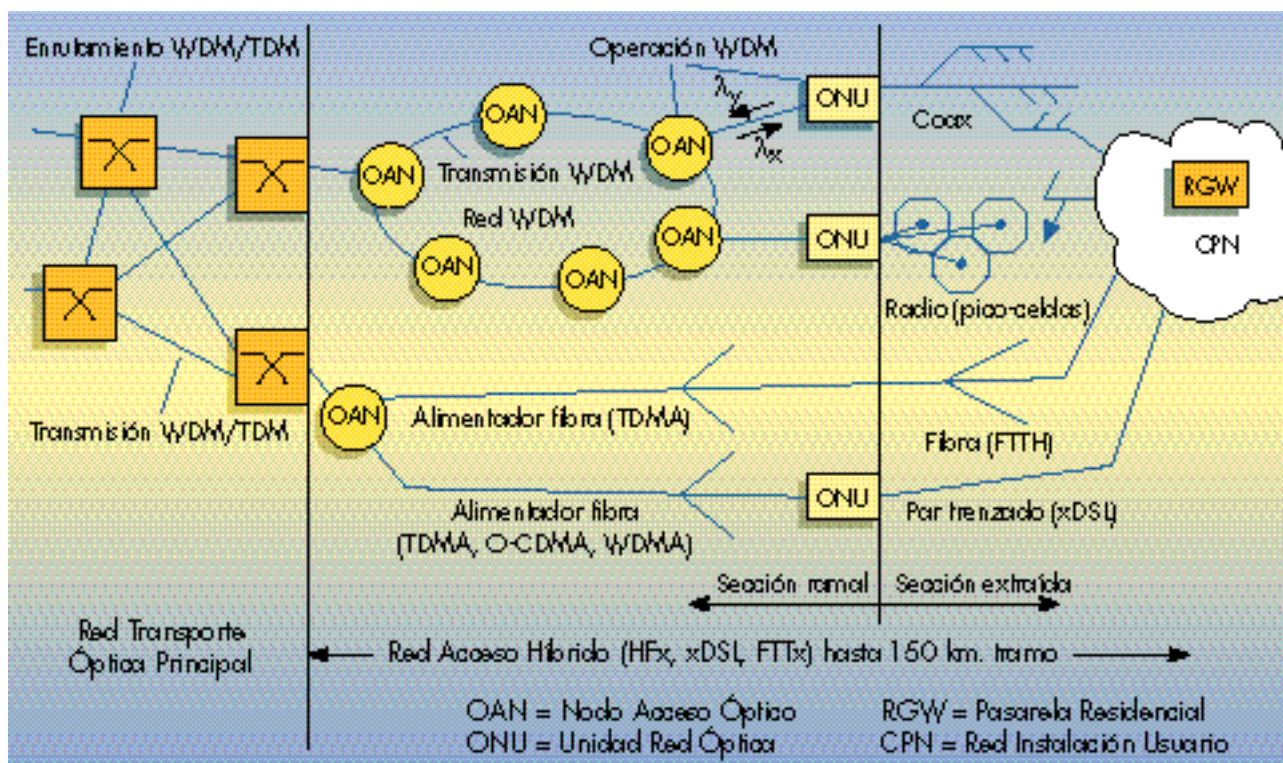


Figura 1 - Arquitectura de red de acceso.

Según los requerimientos de los diferentes operadores, se desarrollarán diferentes tecnologías de fibra híbridas para el último kilómetro, tales como Fiber To The Building/Cabinet (FTTB/Cab, fibra hasta el edificio/cajetín) con cable de bajada de par trenzado, coaxial de fibra híbrido (HFC) con cable de bajada coaxial, radio de fibra híbrida (HFR) con un cable de bajada inalámbrico (**Figura 1**). En algunos casos, las redes de fibra hasta el hogar (FTTH), basadas en arquitecturas de red óptica pasiva (PON), también pueden ofrecer una solución competitiva en coste. Por medio de una configuración en estrella pasiva, una serie de usuarios pueden compartir la misma red de transporte y terminación de línea en el nodo de acceso.

Este artículo analiza los diferentes enfoques de las redes de acceso ópticas que actualmente se encuentran en estudio dentro del Centro de Investigación Corporativo de Alcatel.

■ TDM/TDMA

Red óptica pasiva ATM

Para aplicaciones en PONs, actualmente la solución más madura y efectiva en coste para compartir el ancho de banda de un canal óptico es la división por multiplexación del tiempo (TDM)/acceso múltiple por división del tiempo (TDMA). En una red óptica pasiva ATM (APON), el modo de transferencia asíncrono se utiliza como formato de transporte. La implantación de una solución ATM pura, para servicios de banda ancha residenciales, ofrece numerosas e importantes ventajas, tales como infraestructura e interfaces independientes de la aplicación, completo soporte de la multiplexación de servicios y calidad de percepción de los servicios.

Como se muestra en la **Figura 2**, la red APON ha sido especificada para conectar hasta 64 unidades de red óptica (ONUs) a una terminación de línea (LT) sobre una distancia máxima de 20 km. El factor de división y la distancia alcanzables en la actualidad se encuentran limitados por la cantidad de poten-

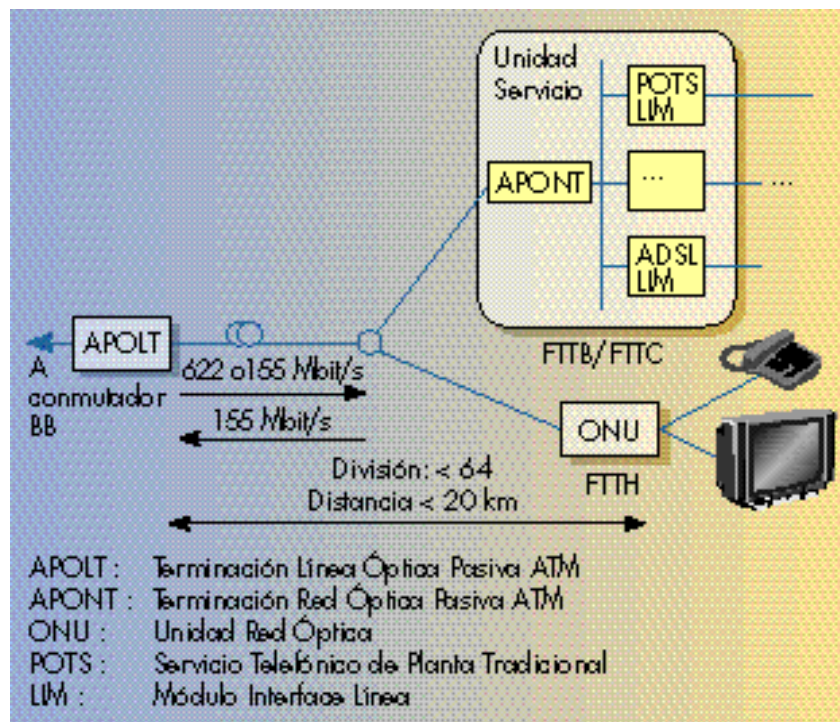


Figura 2 - Arquitectura APON.

cia total de la PON, que es cercano a 30 dB. Esto se corresponde, por ejemplo, con un factor de división de 32 sobre 10 km. o una división de 16 sobre 20 km. Un ancho de banda descendente de 622 ó 155 Mbit/s, y un ancho de banda ascendente de 155 Mbit/s, son compartidos de manera flexible entre las ONUs conectadas. El sistema puede desple-

garse sobre una configuración FTTH, en la cual la ONU se localiza en las instalaciones del abonado o en un FTTCab, donde la ONU se aloja dentro de una cabina en la vía pública y el tramo final de caída hasta el usuario está soportado por enlaces de cobre de alta velocidad, tales como ADSL o VDSL (línea digital de abonado de muy alta velocidad).

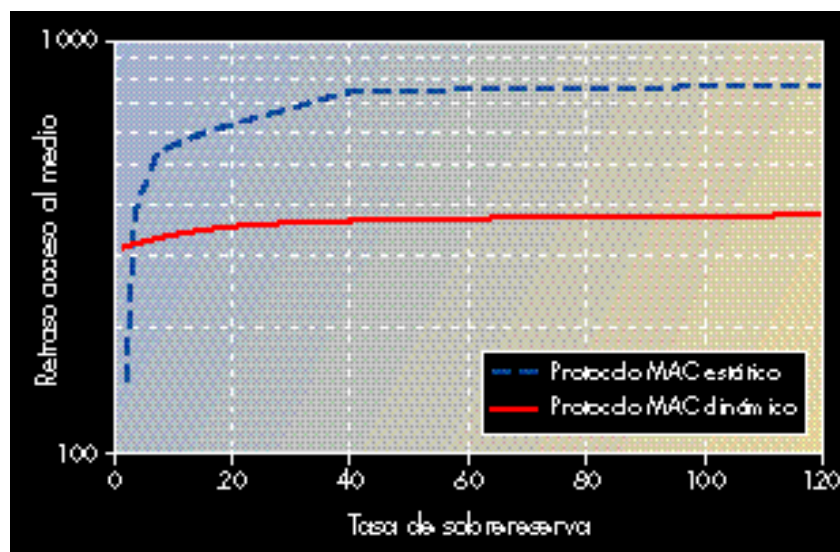


Figura 3 - Retraso en el acceso al medio experimentado por los servicios de velocidad variable impulsada, en función de la tasa de sobrerreserva.

La implantación de la transmisión ascendente sobre un sistema TDMA implica algunas cuestiones técnicas, tales como la ecualización de la distancia de las diferentes ONUs hacia el nodo de acceso y la recuperación de la fase y amplitud de los impulsos subsiguientes en el nodo de acceso. El acceso de la ONU al canal común ascendente es arbitrado por un protocolo de control de acceso al medio (MAC). Los protocolos estáticos MAC convencionales asignan el pico del ancho de banda cuando se establece la conexión. Una multiplexación más eficiente se logra por medio de nuevos algoritmos MAC dinámicos, que aprovechan la velocidad variable o impulsiva inherente a algunos tipos de conexión. La **Figura 3** muestra un APON con 10 ONUs sobre un vano de 10 km. Hay doce fuentes de velocidad variable (VBR) por ONU, con un pico de velocidad de 10 Mbit/s, una velocidad media de 1 Mbit/s y un tamaño medio de los impulsos de 10 células ATM.

Durante los pasados años, se han llevado a cabo numerosas pruebas de campo con sistemas APON: Bermudas (con 100 abonados, en 1994), Reino Unido (prueba IMS de BT, con 2.500 hogares conectados con APON y ADSL, en 1995), Bélgica (prueba de Tectris, con 50 abonados, en 1996), y Francia (prueba Armor, con 100 abonados, en 1996).

El APON ha sido identificado por un grupo internacional de operadores en la iniciativa de red de acceso de servicio total (FSAN) como la tecnología óptica más adecuada para FTTx a corto plazo [2]. Es de esperar que las especificaciones comunes acordadas por el grupo FSAN reduzcan el coste, como resultado de las economías de escala, y aceleren el despliegue de tecnologías ópticas en las redes de acceso de banda ancha.

SuperPON

La evolución a largo plazo del corazón de la red es previsible que conduzca a una considerable reducción del número de nodos, ya que el coste de la conmutación de la red disminuye, al tiempo que el tamaño de los conmutadores se incrementa. En consecuencia, el al-

cance de la red de acceso se incrementará de manera significativa. Además, al estar el coste del nodo de conmutación determinado sobre todo por las tarjetas de línea, el número de accesos debe ser minimizado. En consecuencia, se necesita una red de acceso que multiplexe un gran número de abonados sobre una terminación de línea simple.

Un posible método para crear tal red de acceso de gran alcance y alta división es reemplazar la central telefónica local por una cascada de divisores pasivos ópticos, dando como resultado el así llamado SuperPON (**Figura 4**). La arquitectura perseguida presenta un factor de división óptico de 2.048 y un alcance de 100 km. Como el APON convencional, utiliza un sistema de transporte ATM. La dirección descendente distribuye 2,5 Gbit/s, en tanto que la dirección ascendente comparte 311 Mbit/s.

Al aumentar significativamente la cantidad de potencia de esta red, se introducen amplificadores ópticos para compensar las altas pérdidas. Una importante ventaja que conlleva el usar amplificadores ópticos en lugar de dispositivos electrónicos es la transparencia al formato de datos y a la velocidad. Es más, se facilita la mejora de capacidad usando técnicas WDM.

Los amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA) se utilizan en la

dirección descendente, igual que en las redes HFC. En la dirección descendente, los amplificadores ópticos de semiconductores (SOAs) ofrecen un mejor soporte para la transmisión por modo impulsivo. Un SOA tiene una rápida respuesta, de manera que la señal no se corrompe por el lento establecimiento de la ganancia causada por los cambios bruscos de la potencia de entrada. Además, los SOAs pueden ponerse rápidamente en marcha cuando pasa un paquete ATM y desconectarse el tiempo restante para reducir la acumulación de ruido procedente de los amplificadores ópticos ascendentes en las derivaciones paralelas.

Un modelo de laboratorio ha demostrado la factibilidad del SuperPON [3]. Este modelo mostró la transmisión a 2,5 Gbit/s a través de tres etapas EDFA en la dirección descendente y transmisión de modo impulsivo a través de cuatro etapas SOA en la dirección ascendente. La conmutación de apagado/encendido de los SOAs fue controlada por el dispositivo de alimentación avanzado de una actividad de detección. Se insertaron atenuadores ópticos con pérdidas equivalentes a una división total de 2.048 ONUs y un alcance de 85 km. Simulaciones teóricas han mostrado que son posibles mayores distancias con etapas amplificadoras adicionales.

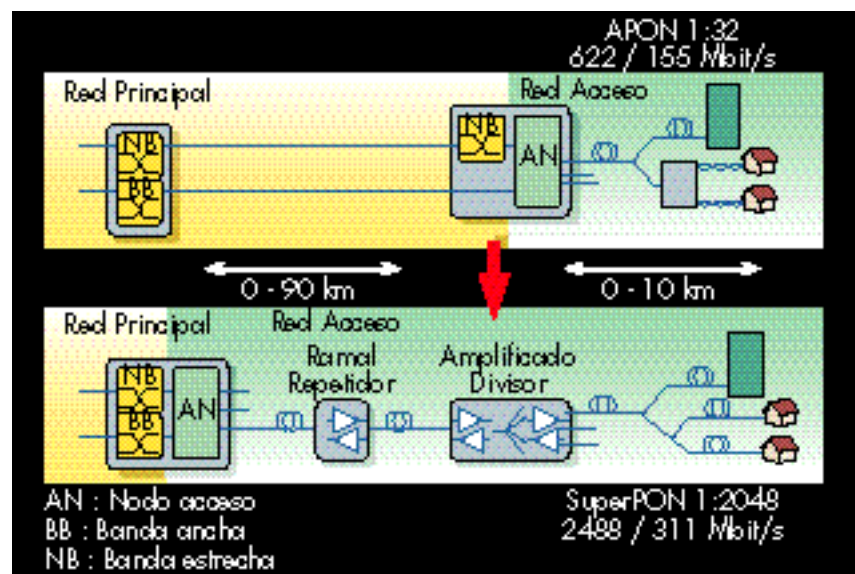


Figura 4 - Evolución de APON a SuperPON.

Aunque el SuperPON es un concepto a largo plazo, algunas de sus características pueden utilizarse con anterioridad. Un APON de 2,5 Gbit/s puede suministrar suficiente ancho de banda a dispositivos ONU con un gran número de puntos VDSL. También puede usarse una capacidad extra de canal descendente para funcionalidades de difusión de vídeo digital (DVB) y nuevos servicios de alto ancho de banda. La integración de un amplificador óptico en cada dirección de transmisión de un APON ya puede incrementar el factor de división hasta cerca de 256 y mejorar la compartición de costes del nodo de acceso.

■ CDMA Óptico para Redes de Alimentación de Alta Capacidad

Las tecnologías basadas en TDMA para multiplexación del canal ascendente son sólo adecuadas para estructuras de redes punto-multipunto porque se requiere un preciso entrelazado de los paquetes en el receptor, así como la realineación de las fases de reloj de paquete a paquete. Esto limita el caudal ascendente total producido en la red hasta cerca de 1 Gbit/s. De cualquier forma, las técnicas asíncronas, como el acceso múltiple por división de código óptico (O-CDMA) y el acceso múltiple por división del ancho de banda (WDMA), que no dependen de la multiplexación temporal, ofrecen mayor flexibilidad para la arquitectura de la red y mejores rendimientos. Las redes multipunto-multipunto es-

tán soportadas, así como las redes multipunto-punto. Al operar los canales ópticos individuales independientemente unos de otros, las velocidades del canal pueden ser mayores que en los sistemas basados en TDMA. La capacidad de encaminamiento óptico de los sistemas WDMA hace que este enfoque sea incluso más flexible.

El número de canales simultáneos en una red basada en O-CDMA o WDMA está limitado a menos de 100, pero la velocidad del canal puede establecerse en cientos de Mbit/s o incluso Gbit/s, con WDMA convirtiendo estas técnicas en apropiadas para su uso en las secciones de alimentación de redes de acceso ópticas, especialmente en redes híbridas coaxial-radio, fibra/ADSL o fibra/VDSL. El factor de compartir más de un millar para usuarios residenciales en estas redes compensa el incremento del coste de componentes, cuando se compara con las técnicas de baja velocidad TDMA, que también son candidatas para aplicaciones FTTH.

El CDMA es bien conocido por su utilidad en la eliminación del ruido de entrada en sistemas de transmisión eléctricos por cable, así como de las interferencias multirayectoria en sistemas de comunicaciones móviles. También ha sido propuesto [4] para su utilización en redes ópticas multiusuario asíncronas de alta velocidad en el área de acceso. En adelante, examinamos un sistema CDMA óptico basado en la codificación en el campo de la frecuencia óptica [5] y presentamos los resultados experimentales que se han logrado con un sistema de laboratorio utilizando filtros ópticos simples.

La velocidad del transmisor es de 155 Mbit/s, en tanto que las capacidades de las redes concebidas iguales o superiores a los 5 Gbit/s.

El principio operativo se ilustra en la **Figura 5**. Los transmisores emiten espectros ópticos periódicamente estructurados de ancho de banda que han sido generados, por ejemplo, filtrando el espectro de salida de un diodo emisor de luz (LED), utilizando un filtro Fabry-Perot. El alcance de espectro libre (FSR) de los filtros es mucho más pequeño que el ancho del espectro fuente. Cuando se transmiten datos binarios, la potencia de salida filtrada por el LED es modulada como un todo por los datos. En el receptor, otro filtro (Mach-Zehnder) es sintonizado con el mismo FSR dando el máximo de transmisión de la energía óptica a través del filtro receptor. Cada transmisor en la red tiene asignado su propio FSR individual que sirve de código en el sistema. Las ventajas de este enfoque residen en la simplicidad de los filtros ópticos y, lo que es más importante, en los relajados requisitos de tolerancia sobre el valor absoluto de los FSR de los filtros. Como se muestra a la derecha de la **Figura 5**, sólo es necesario sintonizar el filtro receptor de uno de los picos en la línea de sintonización para relajar los requisitos sobre absoluta exactitud del filtro (en la **Figura 5** la potencia óptica recibida es trazada como una función de $R_x = 1/FSR_x$).

Ha sido implantado y probado un sistema de transmisión experimental que aplica esta técnica. Consta de ocho transmisores, cada uno operando a 155

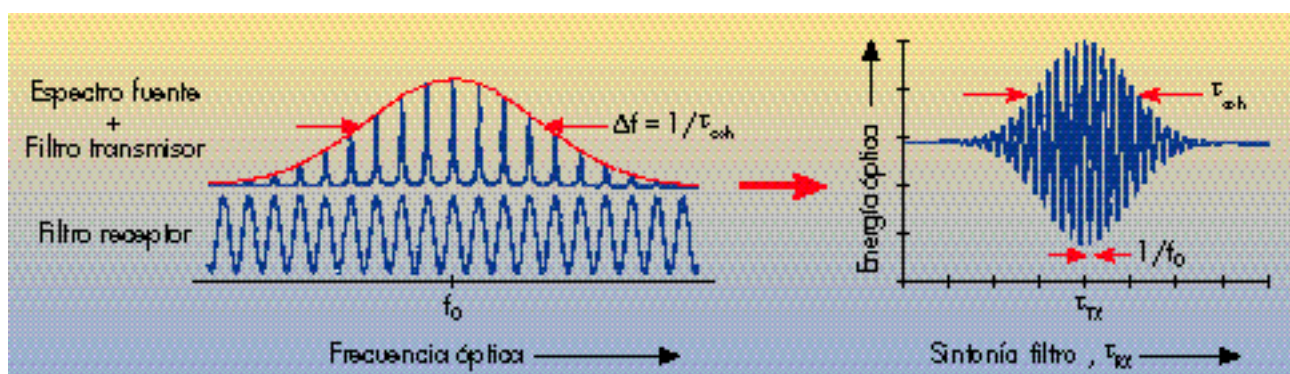


Figura 5 - Principio de codificación de espectro utilizando fuentes de banda ancha y filtros ópticos con espectros de transmisión periódica.

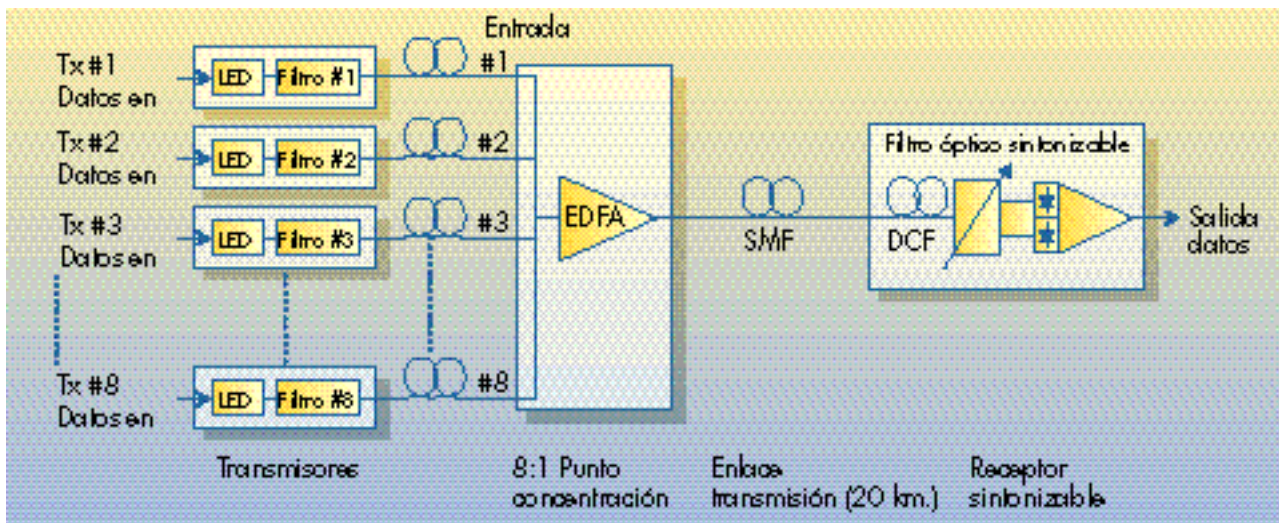


Figura 6 - Configuración de red utilizada para transmisión de 8x155 Mbit/s sobre 20 km de fibra monomodo estándar.

Mbit/s, y de un receptor sintonizable (Figura 6). El espectro de transmisión está generado por LEDs de 155 nm filtrados ópticamente por filtros Mach-Zehnder. Las señales son combinadas por un combinador pasivo 8:1 y amplificadas ópticamente utilizando EDFA de banda ancha. Las señales ópticas se transmiten a lo largo de 20 km. de fibra monomodo (SMF). La dispersión cromática de este tipo de fibra degrada seriamente la calidad de la señal como consecuencia de la extrema anchura (60 a 70 nm) del espectro transmisor óptico. Una corta longitud de la fibra de compensación de dispersión (DCF) ayuda a regenerar el conformado de las señales antes de la detección. En el receptor, un filtro Fabry-Perot sintonizable se utiliza para seleccionar la señal deseada. Un sistema receptor diferencial elimina las señales procedentes de otros transmisores.

Se están investigando características esenciales del enfoque O-CDMA utilizando este equipo de pruebas. Esto incluye la operación independiente y asíncrona de los diferentes transmisores mostrando una tasa de errores binarios (BER) de más de 10^{-10} para ocho transmisores simultáneos con 155 Mbit/s por transmisor (Figura 7) y asignación variable de velocidad entre los transmisores en la gama de 1 a 200 Mbit/s. Se están utilizando diferentes tipos de fuente en paralelo en la red; su longitud de onda central y an-

cho de espectro sólo necesitan ser especificados aproximadamente. Otras investigaciones detalladas se refieren a la optimización de componentes (amplificadores y filtros ópticos) y a los límites del sistema.

Las simulaciones numéricas indican que el número de transmisores simultáneos en la red puede ser incrementado aún más si se utilizan fuentes con líneas estrechas múltiples y filtros receptores Mach-Zehnder. En una configuración como ésta, el exce-

so de ruido inducido por la interacción de las señales procedentes de los distintos transmisores es minimizado, lo que da como resultado redes de hasta 32x155 Mbit/s, con BER de menos de 10^{-9} por cada transmisor.

Otras configuraciones de red también han sido analizadas teóricamente, mostrando que la capacidad de red total alcanzable para una calidad dada de transmisión crece en proporción inversa al número de transmisores en la red. Esto convierte el enfoque O-CDMA

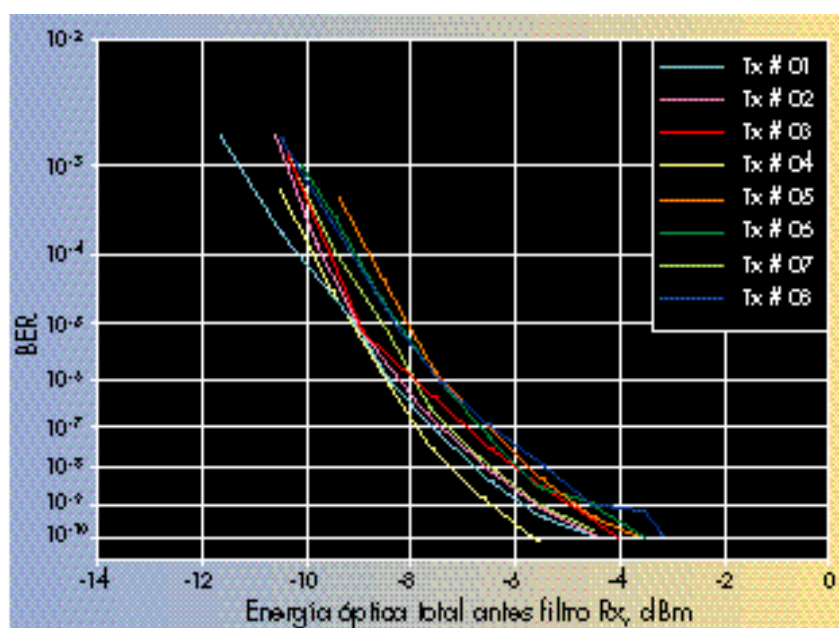


Figura 7 - Medida del BER para cada transmisor en un sistema de 8x155 Mbit/s, operando asincrónicamente sobre una red de fibra de 20 km (ver Figura 6).

en especialmente adecuado para aplicaciones de alimentación donde el número de ONUs es considerablemente menor que en las redes FTTH.

■ Técnicas WDM para la Red de Acceso

Las técnicas de transmisión WDM actualmente están siendo introducidas sobre las infraestructuras de fibra existentes para satisfacer las crecientes demandas de ancho de banda en las redes centrales. Durante los próximos años, los nodos de enrutamiento WDM también serán introducidos para hacer realidad las redes de transporte WDM transparentes. En la red de acceso, las técnicas WDM serán introducidas primero en arquitecturas de red de acceso híbridas para proporcionar la requerida capacidad en la sección de alimentación.

Una cuestión clave hoy en día se refiere a la transferencia de las técnicas de las redes centrales a la red de acceso, no sólo para utilizar la flexibilidad de WDM y sus efectivos esquemas de protección óptica, sino también para soportar algunos nuevos escenarios que han hecho posible formatos de señales especiales en la red de acceso:

- La multiplexación de longitud de onda y la transparencia óptica pueden utilizarse básicamente para transportar diferentes formatos de señal (digital, subportadora, analógica, microondas, etc.) para permitir la multiplexación de otros servicios incompatibles sobre una fibra sencilla y llevar a cabo canales hacia atrás de banda ancha.
- Sencillos principios de enrutamiento WDM pueden emplearse para la gestión económica de los flujos de tráfico dinámicamente variables respecto a requisitos de usuario y servicio. Es más, la WDM proporciona un esquema de direccionamiento eficiente para la selección de las particiones de la red de acceso y de los grupos de usuarios (por ejemplo, el direccionamiento de pico-células en las redes de radio).
- Los rápidos esquemas de protección

óptica hardware, a su vez basados en canales de longitud de onda de reserva y esquemas de conmutación de protección automática, pueden ofrecer soluciones económicas al problema de supervivencia en las redes de acceso.

Las funciones relativas pueden ser implementadas con la ayuda de nodos de enrutamiento de acceso óptico (OAN), pequeños nodos que van desde funciones de selección-enrutamiento de longitud de onda pasivos hasta nodos reconfigurables con capacidad de traducción de longitud de onda (**Figura 1**). No obstante, en tanto que el enrutamiento WDM totalmente óptico de las señales de banda base binarias y digitales está bien demostrado para transconectores ópticos (OXC) en el corazón de la red, el princi-

pal acento en la red de acceso puede estar en el enrutamiento totalmente óptico de señales digitales de subportadoras moduladas en multiniveles, como las señales de modulación de amplitud en cuadratura (QAM), que están siendo empleadas extensamente en las redes de distribución de banda ancha actuales.

Los componentes de enrutamiento totalmente ópticos a utilizarse en los OANs, tales como filtros, conmutadores espaciales multiplexores de longitud de onda y convertidores, son bien conocidos a partir de aplicaciones OXC con señales digitales binarias en el corazón de la red. De los componentes pasivos no se espera que causen problemas adicionales con la degradación de las señales digitales multinivel ni incluso con las analógicas. Las características de transferencia de los

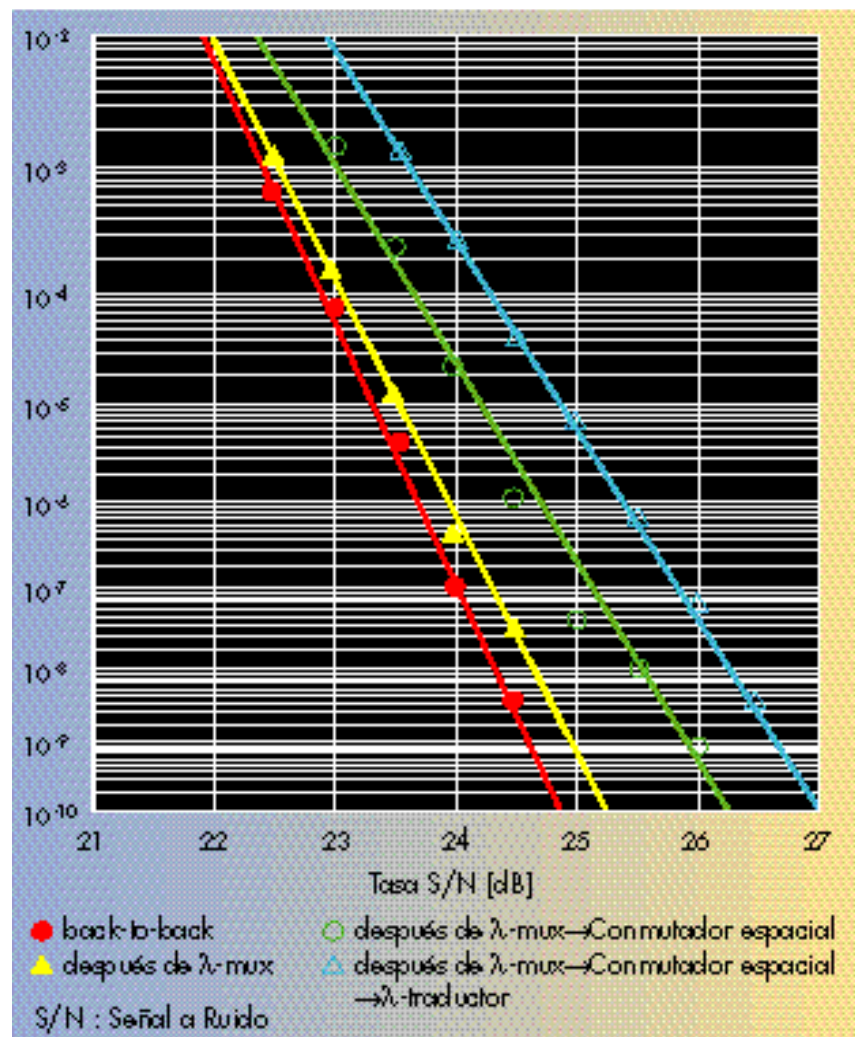


Figura 8 - BER de una trayectoria a través de un OAN con 64 señales QAM.

componentes activos basados en semiconductores, sin embargo, generalmente son no lineales, imponiendo así especiales requisitos de linealidad para evitar la distorsión y la diafonía entre canales [6].

Se han llevado a cabo experimentos iniciales de laboratorio reproduciendo una completa trayectoria a través de un OAN totalmente óptico incorporando multiplexación WDM, conmutación espacial y traducción de longitud de onda; se enrutaron 64 señales QAM junto con señales binarias digitales con una pequeña penalización de sólo 1,5 dB (Figura 8). Estos prometedores resultados pueden abrir el camino a la extensiva utilización de técnicas WDM en las futuras redes de acceso de banda ancha.

■ Conclusión

Se espera para los próximos años un despliegue a gran escala de fibras para FTT-Cab/FTTB y, en algunos casos, FTTH. El sistema APON, que ha sido experimentado en numerosas pruebas de campo, puede utilizarse como una tecnología inicial para soportar esta evolución. A largo plazo, las tecnologías ópticas avanzadas serán empleadas no sólo en el corazón de las redes, sino también en redes de acceso de gran ancho de banda.

El alcance extendido y los factores de división de las SuperPONs harán posible reducir considerablemente el número de nodos de conmutación. Este concepto se persigue principalmente en

las aplicaciones FTTH y podría suministrar decenas de Mbit/s a cada usuario. El CDMA óptico es un nuevo esquema de acceso múltiple adecuado para redes de alimentación de arquitectura arbitraria con velocidades en el entorno de los cientos de Mbit/s por ONU. Las tecnologías WDM no sólo pueden ampliar la capacidad de ancho de banda por canal hasta Gbit/s, sino también facilitar la gestión flexible y la multiplexación de diferentes formatos de señal en la sección transporte de una red de acceso.

■ Referencias

- 1 R.Hoebeke y otros: "Performance Improvement of ATM PON in Multi-service Enviroments by means of Dynamic MAC Protocols", NOC'98, Manchester, Junio de 1998.
- 2 Gx-FSAN Full Service Access Network, *Proceedings of the 3^d Workshop*, Venecia, 22 de Marzo de 1998.
- 3 I. Van de Voorde y otros: "Evaluation of a SuperPON Lab Demonstrator", ECOC '97, Edimburgo, págs. 3.331-3.334.
- 4 G.J. Penock y otros: "Multi-gigabit per second Demonstration of Photonic Code-Division Multiplexing", *Electronics Letters*, volume 33, 1997, págs 2141-2142.
- 5 Th. Pfeiffer y otros: "High Speed Optical Network for Asynchronous

Multi-user Access Applying Periodic Spectral Coding of Broadband Sources", *Electronics Letters*, volume 33, 1997, págs. 2141-2142.

- 6 G. Eilenberger y otros: "Cascadability of Transparent WDM Routing Nodes using Regenerating Wavelength Conversion Components", ECOC'96, Oslo, págs 1.35-1.38.

Gert Eilenberger es líder de proyecto para arquitecturas de redes ópticas en el Departamento de Sistemas ópticos del Centro de Investigación Corporativo de Alcatel en Stuttgart, Alemania.

Thomas Pfeiffer es líder de proyecto para la aplicación de tecnologías fotónicas en redes de acceso ópticas en el Departamento de Sistemas Ópticos del Centro de Stuttgart, Alemania.

Ingrid Van de Voorde es líder de proyecto para SuperPON y FTTH en el Departamento de Acceso a Redes del Centro de Investigación Corporativo de Alcatel en Amberes, Bélgica.

Peter Vetter es manager de proyecto para acceso óptico en el Departamento de Acceso a Redes del Centro de Investigación Corporativo de Alcatel en Amberes, Bélgica.

DESDE LA TRANSMISIÓN AL PROCESO: DESAFÍO PARA LOS NUEVOS DISPOSITIVOS OPTOELECTRÓNICOS

F. BRILLOUET
F. DEVAUX
M. RENAUD

Los nuevos dispositivos optoelectrónicos posibilitarán la construcción de redes ópticas con gran capacidad de tráfico operando a altas velocidades.

■ Introducción

Debido a que el tráfico está aumentando exponencialmente, las tecnologías ópticas están obligadas a desempeñar un papel de mayor importancia en las redes futuras de telecomunicación. Los sistemas de transmisión basados en la Multiplexación por Distribución de Longitud de Onda (WDM) se están orientando hacia velocidades del orden de los varios cientos de Gbit/s. La próxima frontera es la transmisión a velocidad del Terabit (1 Tbit/s = 1000 Gbit/s) que se alcanzará mediante una combinación de WDM y TDM (Multiplexación por Distribución en el Tiempo). Tales velocidades de información necesitarán receptores y transmisores de muy alta velocidad.

Después de estas tecnologías, la introducción de dispositivos ópticos en la red deberá hacer posible el manejo de tráfico de Tbits/s con el objetivo puesto en una red totalmente óptica (ver **Figura 1**)

Muchas tecnologías ópticas ya se han abierto camino en las redes, gracias principalmente a WDM. Actualmente se están probando un cierto número de sistemas que utilizan conceptos muy avanzados tales como funciones para agregar/retirar longitudes de onda y transconectores ópticos (1). El hecho de que tal red óptica transparente sea posible o no, depende en gran parte de una nueva generación de dispositivos optoelectrónicos que incluyen dispositivos ópticos de enrutamiento, como conmutadores y

regeneradores ópticos. El Centro de Investigación Corporativo de Alcatel está valorando tanto el potencial como las limitaciones de estos dispositivos ópticos clave.

■ Transmisores y Receptores de Alta Velocidad de Transmisión

El próximo objetivo: los 40Gbit/s

La tecnología WDM ofrece una manera de aumentar significativamente las prestaciones de las líneas de transmisión ya instaladas con fibra óptica. Mediante la utilización de longitudes de onda entre los 1530-1560 nm, espaciadas 100 nm, es posible que una fibra transporte más de 40 canales. Las mejoras en las prestaciones de los Amplificadores de Fibra óptica (OFA) están ampliando el rango de frecuencia al triple (más de 100 GHz). En paralelo, el espaciamiento entre longitudes de onda se está estrechando hasta los 50 nm. Este incremento tan significativo en la capacidad de información está potenciado aún más por el incremento de la velocidad básica de bit mediante la utilización de la técnica TDM. Los sistemas WDM a 10 Gbit/s (un incremento 4 veces mayor) constituyen actualmente la configuración líder en cualquier sistema de reciente instalación. Debido a que el incremento de capacidad se beneficia de las mejoras en WDM y TDM, el próximo objetivo se espera que sea el sistema de 40 Gbit/s.

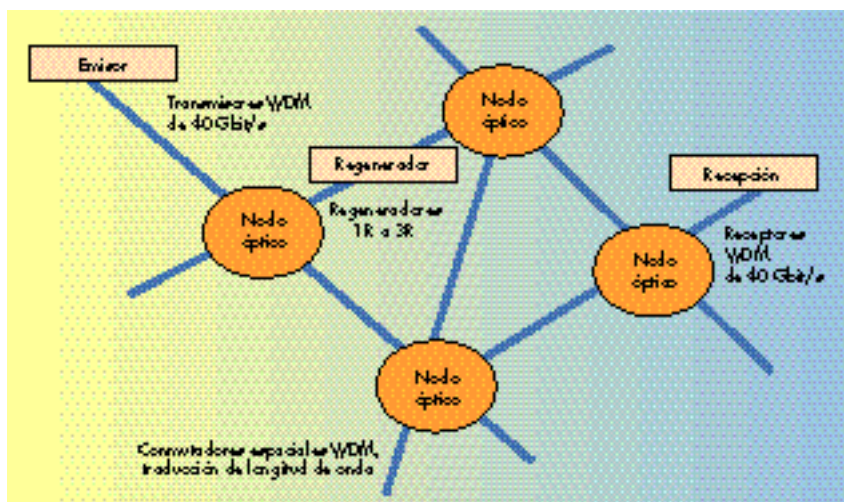


Figura 1 - Vista de una red totalmente óptica basada en transmisores y receptores de alta velocidad, dispositivos ópticos de enrutamiento y regeneradores ópticos.

Los principales elementos necesarios para conseguir este objetivo son:

- El coste de la electrónica que aumenta con la velocidad. Sin embargo, el perfeccionamiento de la tecnología microelectrónica continúa reduciendo este coste para una velocidad dada de operación
- Los requisitos de la Dispersión del Modo de Polarización (PMD) que se hacen más exigentes a mayores velocidades de operación, impidiendo que la velocidad de la misma alcance los 10 Gbit/s en conexiones troncales que utilicen fibras de gran PMD. Sin embargo, se espera que aparezcan técnicas de compensación. Se han desarrollado nuevas fibras en paralelo que ofrecen una mejora en PMD en un alto orden de magnitud.
- Una precisa compensación de la dispersión y una relación mejorada Señal-Ruido (SNR) que conducirán a nuevos diseños de sistemas con fibra.

Emisores a 40 Gbit/s

En el lado emisor, la modulación externa es la forma correcta de controlar los chirp (transitorios de frecuencia entre los niveles binarios de una señal óptica, tal como se ha demostrado en la propagación sobre fibras de dispersión positiva a 2,5 y 10 Gbit/s).

Los moduladores basados en InP relajan los requerimientos de margen dinámico del voltaje de los circuitos de ataque ($V_{pp}=2-3V$), comparado con el voltaje que requieren los moduladores de LiNbO₃ (4-5V). Ésto representa una ventaja significativa para el diseño del circuito de ataque electrónico a esta velocidad. Además, este tipo de modulador puede ser integrado junto al láser, eliminando la necesidad de una fibra para mantener la polarización con sus pérdidas de acoplamiento asociadas.

Se pueden utilizar dos tipos de moduladores para codificación óptica:

- Moduladores de Electro-Absorción (EA): Estos moduladores operan a través de un desplazamiento al rojo del borde de absorción cuando se

les aplica un voltaje de polarización. Se ha construido una estructura compacta de 100µm de largo, con una anchura de banda de 35 GHz, a 3 dB, y se ha integrado con un láser de potencia de salida de 0 dBm (**Figura 2**). Este dispositivo es un derivado de un producto a 10 Gbit/s que está disponible comercialmente en Alcatel Optronics.

- Moduladores Interferométricos de Mach-Zehnde (M-Z) (configuración estándar de moduladores LiNbO₃): En esta configuración, un voltaje aplicado a un brazo del interferómetro induce un desplazamiento de fase (a través del efecto electro-óptico) que lo convierte en una modulación de amplitud a la salida del modulador. Este modulador opera con una mayor desintonía espectral entre el modulador y el láser (diferencia de frecuencia óptica entre el láser y el pico de fotoluminiscencia del modulador). Consecuentemente, los moduladores M-Z muestran una baja sensibilidad a la longitud de onda de entrada. Como ejemplo, un modulador M-Z construido con InP y probado a 10 Gbit/s sobre fibra estándar ofrecía unas prestaciones similares (sensibilidad de -29 dBm sobre una distancia de transmisión de 130 km.) utilizando la misma polarización y voltaje pico a pico

($V_{pp}=2V$), a través de toda la gama de longitudes de onda de Amplificadores de Fibra óptica (OFA). Tal resultado hace que este dispositivo resulte muy atractivo para su utilización en WDM.

- Además ya se ha integrado un láser de 10 Gbit/s con su modulador M-Z. (ver **Figura 2b**)
- La ampliación del funcionamiento hasta los 40 Gbit/s requiere una estructura de electrodo en guía de onda. Con tecnología de InP, el diseño de una concordancia específica en las velocidades de ondas eléctricas/ópticas, asociado a una respuesta electro-óptica más potente, conduce a dispositivos más cortos, típicamente 0,2 cm., comparados con los 8 cm. con LiNbO₃. En dispositivos cortos, el deficiente apareamiento residual tiene un efecto menor sobre la deriva del voltaje de ataque, de modo que un voltaje de ataque de 2 V constituye un objetivo realista sobre InP, comparado con los 4,5 sobre LiNbO₃. Los resultados preliminares sobre InP demuestran un ancho de banda eléctrico de 35 GHz.

Dos enfoques a la multiplexación en el tiempo

Las señales ópticas a 40 Gbit/s pueden generarse mediante Multiplexación

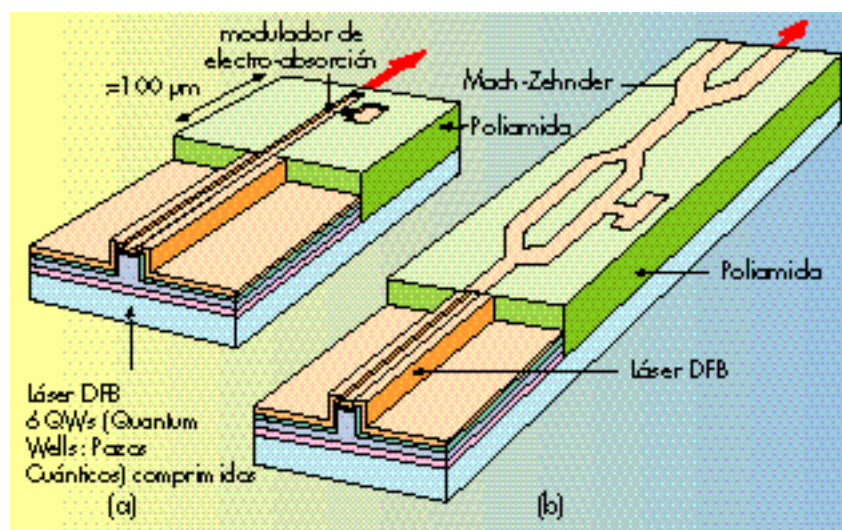


Figura 2 - Estructuras integradas de moduladores de láser: (a) Moduladores de Electro-Absorción, y (b) Modulador de Mach-Zehnder.

Eléctrica por División en el Tiempo (ETDM), de forma similar a las generación de señales a 2,5 Gbit/s y 10 Gbit/s. También pueden generarse mediante entrelazado óptico de tramas de impulsos a 10 Gbit/s utilizando Multiplexación Óptica por División en el Tiempo (OTDM). En ambos tipos de moduladores se obtiene corrientemente una Relación de Extinción (ER) entre los estados ON y OFF del orden de los 10 dB, satisfaciendo los requisitos del formato ETDM. Sin embargo, los requisitos de la ER se disparan por encima de los 30 dB en el caso del formato OTDM, necesitando un modulador de doble etapa por ejemplo.

Receptor de 40 Gbit/s

En el lado receptor, se han potenciado las prestaciones del detector PIN a 40 Gbit/s mediante su integración con un Amplificador Óptico Semiconductor (SOA) en un módulo receptor (**Figura 3**). Este módulo receptor tan compacto ($2 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$), con una sensibilidad de -31,4 dB a 10 Gbit/s, presenta una anchura de banda de 40 GHz y un margen dinámico en la potencia de entrada mayor de 30 dB. En las aplicaciones WDM, un filtro sintonizable insertado entre el SOA y el detector reduce el ruido de entrada y puede seleccionar la longitud de onda que se desea detectar dentro de un rango de 20 nm.

■ Componentes ópticos para Interconexión

Las tecnologías ópticas se utilizaron inicialmente para potenciar la capacidad de los enlaces punto-a-punto. Sin embargo las técnicas WDM se están explotando actualmente para su utilización en las redes ópticas. Las redes de transporte ópticas WDM basadas en una combinación de Multiplexores Ópticos para Insertar/Extraer (OADMs) longitudes de onda y Transconectores Ópticos (OXC), que utilizan encaminamiento y conmutación ópticos, serán necesarias para proporcionar una capacidad y flexibilidad suficientes para satisfacer el enorme incremento de tráfico previsto en los próximos años. En este contexto, existe una gran demanda de componentes ópticos para encaminamiento y conmutación. Además de los dispositivos terminales como láseres y receptores, hay una necesidad de dispositivos procesadores de luz tales como amplificadores ópticos, conmutadores espaciales ópticos, convertidores ópticos de longitud de onda y filtros ópticos.

Los componentes diseñados para su utilización en las redes ópticas, deben cumplir con una serie de requisitos sobre prestaciones, incluyendo la independencia respecto a la polarización, un gran ancho de banda óptico compatible con el rango de OFA, una pérdida de inserción baja y una trans-

parencia respecto a la velocidad de bit (por lo menos hasta un cierto valor). El coste constituye también un factor importante que favorece las estructuras genéricas tolerantes respecto al proceso que sean compatibles con la integración. Un SOA puede operar en varios regímenes adecuados a diversas aplicaciones que hacen a este dispositivo especialmente atractivo. En régimen lineal se le puede utilizar como un amplificador óptico o pre-amplificador (tal como se ha mostrado anteriormente) o como puertas ópticas; se puede explotar el régimen de saturación para conversión y selección de longitud de onda. Los SOAs aparecen entonces como elementos clave (4) para conmutación espacial, conversión de longitud de onda o selección de la misma, tal como se ilustra en la **Figura 4**.

Se puede utilizar la integración -bien híbrida o bien monolítica- de los SOAs con la adecuada circuitería en guía de onda pasiva para proporcionar funciones de encaminamiento y de proceso. Obsérvese que la conmutación espacial también es posible a través del encaminamiento de longitudes de onda utilizando el bloque selector de longitudes mostrado en la **Figura 4c**.

Ya se han utilizado dos de estos dispositivos basados en SOAs (conmutadores espaciales basados en puertas SOA de ganancia controlada -clamped- y convertidores de longitud de onda totalmente ópticos) en pruebas de campo en el modo Transconector Óptico ya presentado en otro artículo de este número (5).

Receptor de 40 Gbit/s

Hoy en día, la mayoría de los sistemas que explotan la conmutación espacial utilizan conmutadores electromecánicos debido a que es la tecnología más madura. Sin embargo, esta tecnología presenta un escaso potencial de integración y su velocidad de conmutación está limitada a los milisegundos. Los conmutadores termo-ópticos de polímero, que presentan un alta capacidad de integración pero una velocidad limitada de conmutación, podrían ofrecer una solución alternativa cuan-

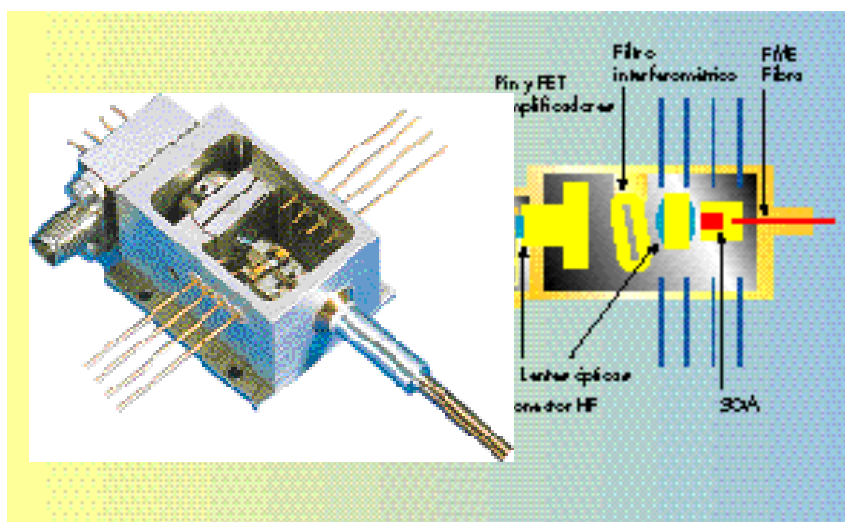


Figura 3 - Módulo receptor SOA-PIN.

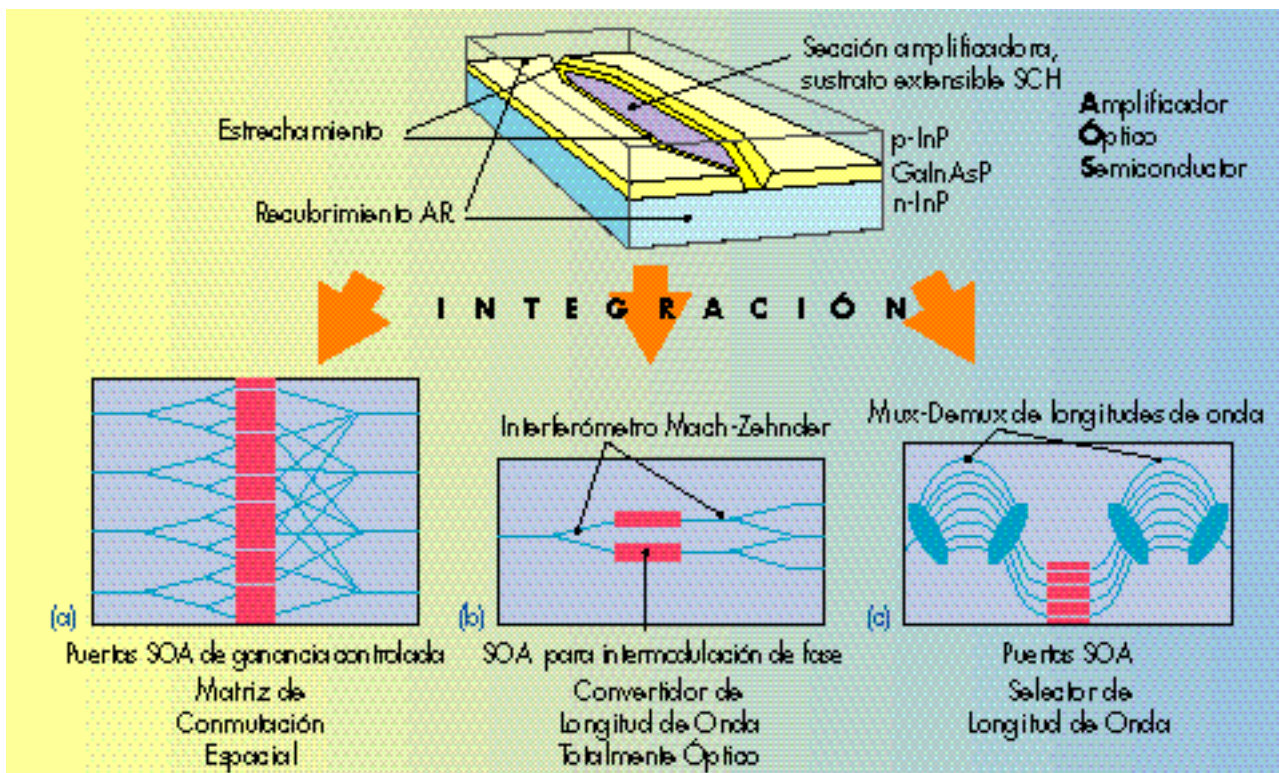


Figura 4 - Matriz de conmutación espacial, convertidor de longitud de onda totalmente óptico y selector de longitud de onda aprovechando la tecnología SOA como un elemento genérico de construcción.

do se resuelva el problema de la diafonía. Los conmutadores espaciales basados en SOAs presentan una relación de extinción alta (>50 dBs) combinada con un conmutación rápida; también son los únicos dispositivos de conmutación que proporcionan un ganancia en lugar de pérdidas.

Mientras que los SOAs convencionales generan diafonía en operación multi-longitud de onda, los SOAs de ganancia controlada (CG-SOAs) generan una diafonía escasa, incluso cuando existen un gran número de canales. Ya se han fabricado módulos SOA de ganancia controlada, con una ganancia típica, fibra a fibra, de 14 dBs, variaciones de ganancia por debajo de 1dB en el rango 1550-1560 nm, velocidades de conmutación inferiores al nanosegundo y sensibilidad a la polarización por debajo de 0,5 dB. También se han fabricado módulos que incorporan estructuras de cuatro dispositivos CG-SOA (ver **Figura 5**) como un paso preliminar hacia una integración a mayor escala. Se ha conseguido una uniformidad de prestaciones excelente en y

entre los dispositivos de la estructura y también entre los módulos, lo que muestra un potencial significativo para esta tecnología.

Recientemente, se han fabricado estructuras de hasta ocho CG-SOAs con características uniformes y una

anchura de banda óptica hasta los 60 nm, a 3 dBs. Los siguientes pasos hacia una integración a mayor escala requerirán una combinación de la integración monolítica para producir las estructuras de SOAs, guías de onda pasivas de SiO₂ de bajas pérdidas y el pro-

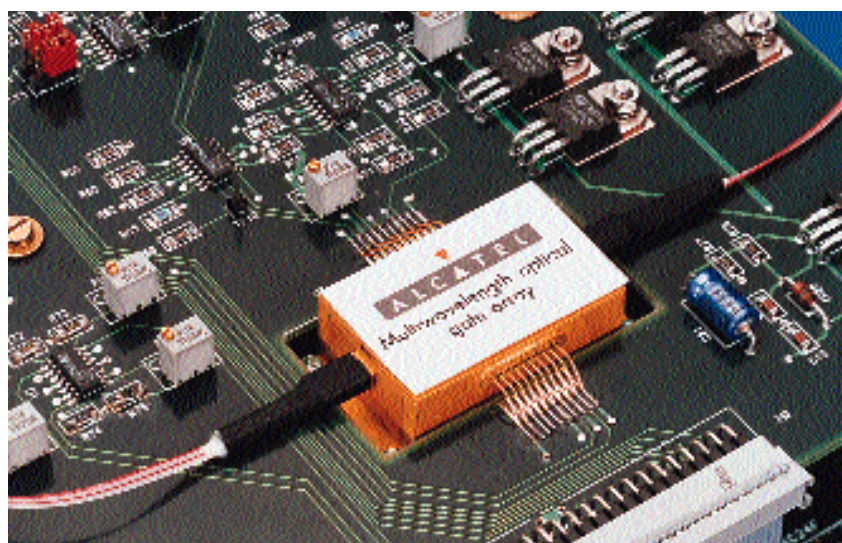


Figura 5 - Fotografía de un módulo con una estructura de cuatro CG-SOA sobre su tarjeta electrónica, tal como se utiliza en el proyecto OPEN (6,7).

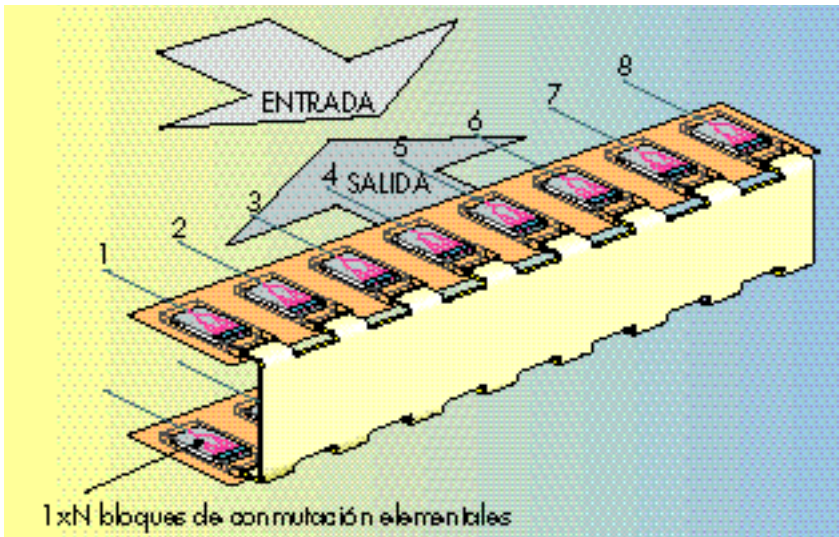


Figura 6 - Tecnologías para fabricar de forma modular y escalable grandes estructuras de conmutación basados en SOAs (matrices de SOA, montajes sobre SiO₂, montaje en flip-chip e interconexión con cable de cinta flexible).

ceso flip-chip (chip invertido) autoalineado para encapsulado.

La **Figura 6** muestra un conmutador espacial de 8x8 e ilustra como ambas tecnologías pueden combinarse para realizar tales dispositivos. Conmutadores espaciales a una escala mayor pueden reutilizar bloques de este tipo organizados en arquitecturas tipo Clos, Benes u otras.

Convertidores de longitud de onda totalmente ópticos

La conversión óptica se realiza normalmente mediante conversión opto-

electrónica (detección y re-emisión de otra longitud de onda) y cuenta con electrónica de ataque de alta velocidad para conseguir señales binarias de alta velocidad. Los convertidores de longitud de onda totalmente ópticos, que no necesitan electrónica de alta velocidad, serían muy atractivos, especialmente para alta velocidad. Sólo se pueden concebir tales dispositivos si mantienen, o incluso mejoran, la calidad de la señal.

Los requisitos clave para todos los convertidores de longitud de onda totalmente ópticos incluyen la transparencia respecto a la velocidad binaria,

insensibilidad a la polarización, capacidad de conversión ascendente y descendente de longitud de onda, mejora de la ER para permitir realizaciones en cascada y capacidad de sintonización en un amplio margen de longitudes de onda. Las estructuras interferométricas que utilizan una modulación cruzada de fase en los SOAs pueden satisfacer todos estos requisitos. En particular, ofrecen la posibilidad de una mejora sustancial de la ER (típicamente una salida de ER>10dB para una ER de entrada >7dB, junto con una reducción en la distribución del ruido óptico).

Estos dispositivos proporcionan lo que se denomina regeneración 2R (Re-amplificar y Re-conformar la señal) y ello mejora de forma considerable la calidad de la misma y permite estructuras cascadas para transmisión. En la **Figura 7a** se ilustra el principio de la operación para un convertidor interferométrico tipo MachZehnder. La señal de entrada modulada en amplitud acoplada a un brazo del dispositivo Mach-Zehnder, modula la ganancia y la fase de la salida de la sonda de Onda Continua (CW). Esta modulación en fase se transforma en una modulación de amplitud mediante el interferómetro. También, debido a que las propagaciones de la entrada y las señales convertidas se contrarrestan en el dispositivo, no se necesita un filtro óptico para seleccionar la longitud de onda de la señal convertida a la salida del dispositivo. En principio, la conversión a la misma longitud de onda es por lo tanto posible. Se ha conseguido obtener excelentes características hasta los 10 Gbit/s (**Figura 7b**) en el rango de longitudes de onda de los 1530-1560 nm.

Por otra parte, se ha demostrado con los interferómetros de Michelson la operación a mayor velocidad (hasta los 40 Gbit/s). Sin embargo estos dispositivos no son compatibles con una operación sin filtros y consecuentemente no pueden convertir a la misma longitud de onda. La operación de contra-propagación estará finalmente limitada en velocidad de conversión por el tiempo de tránsito. Recientemente se han realizado estructuras Mach-Zehnder especiales, que permiten una

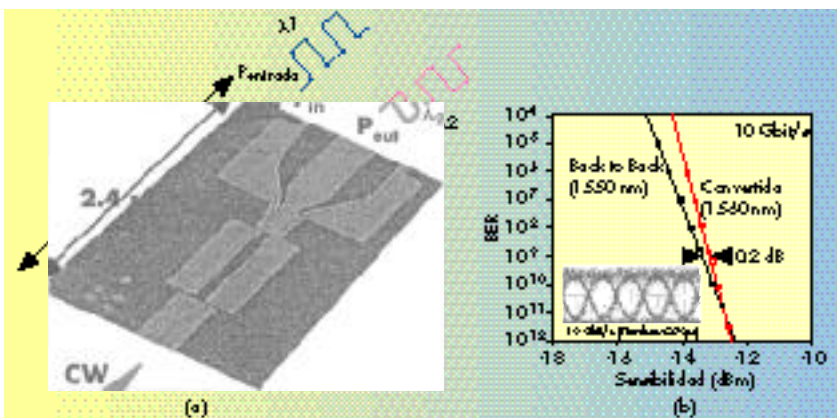


Figura 7 - (a) Fotografía de un convertidor de longitud de onda totalmente óptico y el principio de operación de la contra-propagación, y (b) medida de la Tasa Binaria de Errores (BER) y diagrama de ojo de una señal convertida a 10 Gbit/s. La penalización en sensibilidad que resulta de la conversión de longitud de onda es solamente de 0,2 dB a un BER de 10⁻⁹.

operación sin filtros en un modo de operación de co-propagación (superando las limitaciones por tiempo de tránsito) y abriendo la posibilidad de velocidades de conversión en el rango de los 80 Gbit/s (en el modo de co-propagación la señal del PIN y la onda de la señal CW se propagan en la misma dirección).

Al contrario que los dispositivos optoelectrónicos, estos convertidores necesitan una potencia de ataque aproximadamente constante e independiente de la velocidad binaria.

■ Regeneración Óptica

Debido a que la demanda de mayores velocidades binarias aumenta constantemente, la regeneración de las señales ópticas es una opción a considerar. En lugar de una conversión optoelectrónica seguida por proceso electrónico, los regeneradores se podrían construir con dispositivos solamente ópticos. Como nuevo campo de investigación, se están explorando y evaluando actualmente muchas ideas de este tipo.

La necesidad

A la regeneración se la ha considerado desde hace mucho tiempo como la última solución para superar los límites de la transmisión, solamente adecuada para los agotados sistemas con cobre. Sin embargo, hoy en día, la demanda para velocidades binarias mayores está creciendo constantemente y el mercado está sacando adelante nuevas tecnologías. Primero el número de canales WDM estará limitado finalmente por el ancho de banda óptico de los amplificadores de fibra, incluso aunque aquella se haya ampliado. La velocidad binaria por canal WDM debería alcanzar los 10 ó los 40 Gbit/s. En este contexto, los regeneradores deberían proporcionar un camino sencillo para actualizar los sistemas básicos de 3,5 Gbit/s. Segundo, la transmisión WDM debería permitir redes ópticas, en las que los datos permanecen en el dominio óptico desde un extremo al otro de la línea. Se es-

pera, sin embargo, que la distorsión y el ruido se vaya acumulando a medida que la señal se propague a través de los varios enlaces y nodos. Los regeneradores en la redes ópticas deberían no sólo incrementar la longitud de la transparencia, sino también facilitar el problema del interfaz a la red y la monitorización de la señal, elementos necesarios para la gestión de red

Regeneración 2R

El grado de regeneración se califica normalmente por el número de Rs que tenga: 1R significa sencillamente Re-amplificación; 2R significa 1R más Re-Modelado (Reshaping) de la señal y 3R significa 2R más Re-temporización, éste es el último tratamiento rejuvenecedor. Los amplificadores de fibra óptica son excelentes regeneradores ópticos 1R. La conformación de señal se realiza mediante un dispositivo no lineal, tal como se muestra en la **Figura 8**. En la práctica, la transmisión no

lineal se puede conseguir optoelectrónicamente mediante la asociación de un modulador Mach-Zehnder con un fotodiodo de alta velocidad, tal como se muestra en la **Figura 8**.

Para esta configuración los fotodiodos y los moduladores MachZehnder integrados con láseres monocromáticos están siendo cualificados para 10 Gbit/s. Se está investigando también la ampliación hasta los 40 Gbit/s (ver también la sección sobre Transmisores y Receptores de alta velocidad binaria).

La figura muestra que la longitud de onda se genera localmente y puede, por lo tanto, cambiarse. Resulta que los mejores candidatos para conversión de longitud de onda (descrito en el párrafo anterior) son los regeneradores 2R. El dispositivo totalmente óptico, que se muestra en la **Figura 7**, realiza la misma función que el regenerador optoelectrónico 2R anterior, pero es más compacto y se espera que disipe menos potencia.

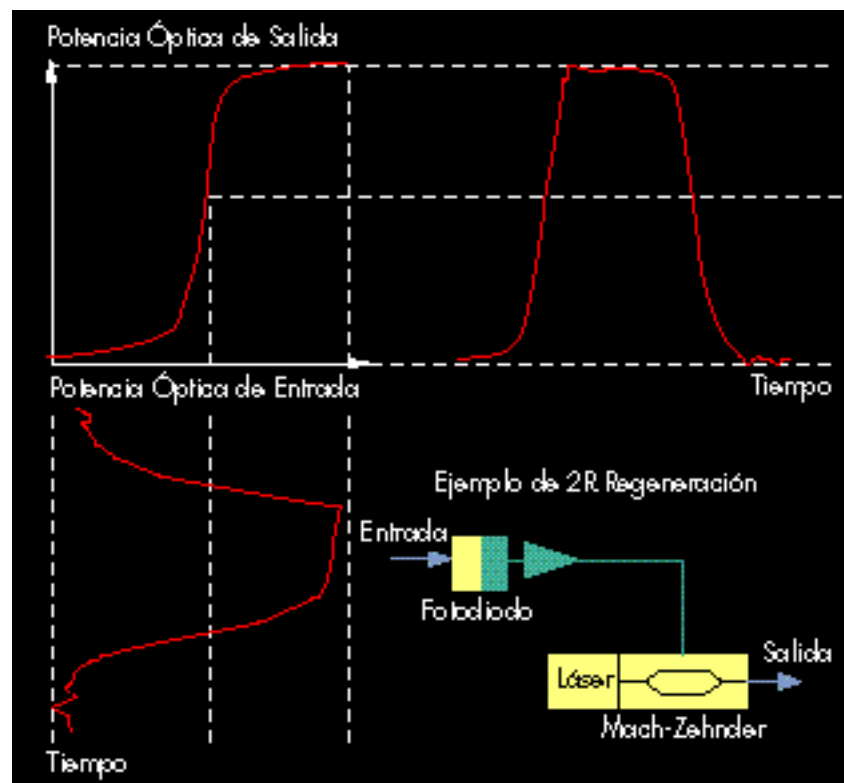


Figura 8 - La conformación de una señal óptica distorsionada y con ruido (inferior izquierda) se ha realizado mediante un dispositivo óptico no lineal, para el cual la potencia óptica de salida no es proporcional al nivel de potencia de la entrada (arriba a la izquierda). Se podría conseguir la transmisión no lineal mediante un interferómetro de Mach-Zehnder (en la figura).

Regeneración 3R

La regeneración 2R es efectiva para la supresión de ruido y la conformación de la señal distorsionada por fenómenos tales como la dispersión cromática y dispersión del modo de polarización. Sin embargo, en la práctica, los regeneradores no ideales 2R estrechan o ensanchan las señales ópticas de No-Retorno a Cero (NRZ) y conduce a un cerramiento lateral del diagrama de ojo (fluctuación de fase) afectando a las prestaciones de forma negativa. Por lo tanto, la tercera R, que significa Retemporización resulta necesaria.

La regeneración 3R representa un gran desafío para el proceso óptico, y se están investigando actualmente muchas soluciones (6,7). Se han identificado varias configuraciones tal como se muestra en la **Figura 9**.

El regenerador totalmente óptico (**Figura 9** parte superior) es de hecho una adaptación del regenerador eléctrico al mundo óptico. Cada bloque puede reemplazarse con un bloque equivalente a su homólogo eléctrico. La señal óptica se divide en dos partes. La primera de ellas se conecta como entrada al dispositivo de recuperación de reloj, el cual emite un tren limpio de impulsos ópticos, que están interrumpidos o no mediante un dispositivo de decisión en función de la segunda parte de la señal óptica.

Podemos imaginar en el futuro un dispositivo del tipo mostrado en la **Figura 10**. La circuitería pasiva realizándose sobre una base de SiO₂/Si que alberga los dispositivos activos autoalineados. Toda la regeneración del reloj se podría realizar mediante un láser autopulsante sintonizable (7). La conmutación de los impulsos podría realizarse utilizando un dispositivo MachZehnder totalmente óptico, tal como se ha descrito anteriormente. En el presente caso la señal óptica digital se divide de nuevo en dos, la primera se conecta como entrada a la primera rama de control que conecta el dispositivo, mientras que la segunda rama se retrasa un tiempo, fijado por la velocidad de bit, entra en la segunda rama y desconecta el Interferómetro. En este caso, el tiempo de con-

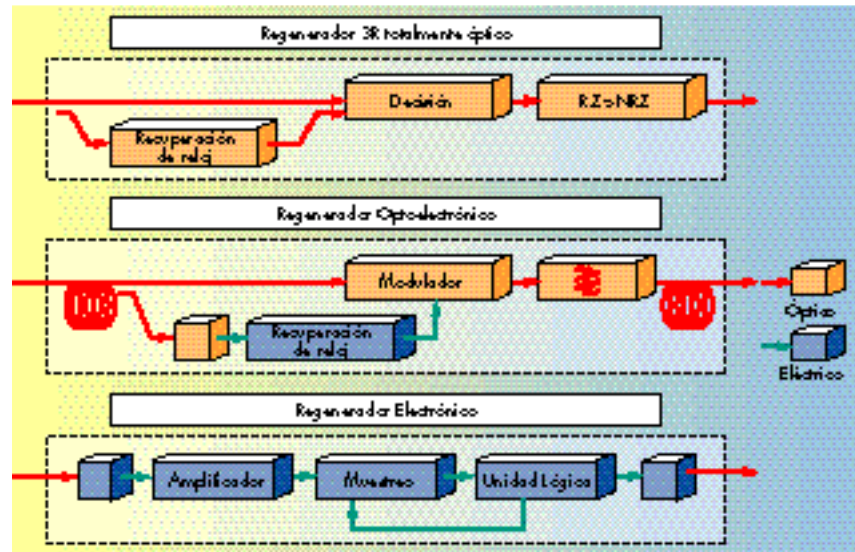


Figura 9 - Se han identificado tres arquitecturas posibles para la regeneración 3R de señales ópticas; se muestran dispositivos eléctricos y ópticos en colores naranja y azul respectivamente.

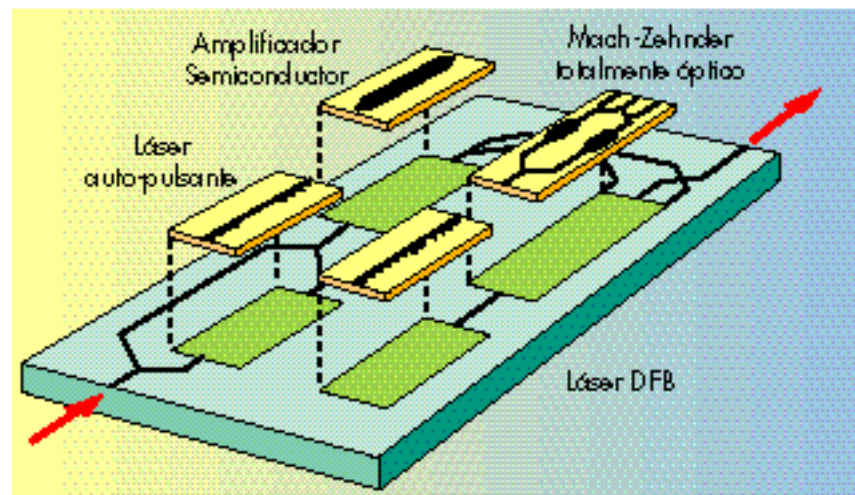


Figura 10 - Concepción futurista de un regenerador 3R totalmente óptico, realizado con dispositivos de proceso totalmente ópticos montados sobre una base de silicio con sus guías de onda de dióxido de silicio.

mutación sólo necesita ser menor que el tiempo de bit.

Hasta ahora la regeneración 3R parecía fácil de implantar sobre señales ópticas RZ (por ejemplo, pulsadas). Sin embargo, el código NRZ es el formato estándar para los sistemas de transmisión terrestres y la mayor parte de enlaces submarinos. La conversión de RZ a NRZ puede realizarse fácilmente puesto que consiste principalmente en un ensanchamiento del impulso. La operación inversa -NRZ a RZ- resulta más difícil. Actualmente proyectamos mues-

trar la señal NRZ con un tren de impulsos ópticos. La integración monolítica de un amplificador semiconductor y un interferómetro tipo MachZehnder también serviría como un regenerador

Otros regeneradores 3R

La regeneración 3R puede realizarse de varias formas. Este par de soluciones resulta bastante atractivo.

Primero, el regenerador optoelectrónico (en el medio de la **Figura 9**) se basa en un efecto de reducción de la

fluctuación de fase, debido a la propagación no lineal en la fibra. En la práctica se podría construir un dispositivo de regeneración de reloj y un modulador óptico, todo en una pequeña cápsula utilizando tramos cortos de fibra. La única funcionalidad de este regenerador 3R consiste en que la longitud de onda de salida es, de hecho, la misma que la longitud de onda de la entrada. En realidad, utilizando sólo este tipo de regenerador, la regeneración WDM 3R se realizaría simultáneamente, aunque independientemente, a todos los canales. Ésto presentaría una ventaja clave al considerar la tendencia hacia un mayor número de canales (de 20 a 80 canales planeados).

Segundo, se ha propuesto un nuevo regenerador electrónico tal como se muestra en la parte inferior de la **Figura 9**. Está basado en un filtrado puramente digital y en un oscilador no enganchado. Esta configuración, aunque probablemente limitada a 10 Gbit/s, debería permitir una flexibilidad en la velocidad de bit, bien basada en múltiplos de la velocidad básica de bit, o una completa flexibilidad. Tal transparencia podría considerarse importante cuando se espera que varíe la velocidad de bit, bien durante un tiempo corto, como en las redes totalmente ópticas, o sobre periodos largos de tiempo tal como ocurre al actualizar un sistema de transmisión.

■ Conclusión

Más allá de la tecnología actual, se está demostrando, a nivel de investiga-

ción, una nueva generación de componentes optoelectrónicos operando a mayores velocidades de bit (40 Gbit/s y superior), ofreciendo un nivel más alto de transparencia (mediante utilización de conmutación óptica, conversión de longitud de onda óptica, filtrado de longitudes de onda y regeneración óptica 2R y 3R). Alcatel está utilizando esta investigación para evaluar la factibilidad de estas nuevas ideas y valorar su potencial y sus limitaciones para utilizarlos en sus nuevos productos.

■ Referencias

- 1 J-L. Beylat, M. Chbat, A. Jourdan, P.A. Perrier: "Field Trials of All-Optical Networking Based on Wavelength Conversion", Revista de Telecomunicaciones de Alcatel, 3er trimestre 1998, págs. 218-224.
- 2 B.Clesca y otros: "2.5Gb/s 1291km Transmission over Non-Dispersion-Shifted Fiber using an Integrated Electro-Absorption Modulator/DFB Module", ECOC'95.
- 3 D. Lesterlin y otros: "124km Transmission over Standard Dispersion Fiber at 10Gb/s with Low Driving Voltage Integrated Laser Modulator", OFC'96.
- 4 M. Erman: "System Demonstrations and Assessment of Optical Switching in Broadband Networks", Photonic Networks: Advances in Optical Communications, Springer-Verlag 1997; Editor Giancarlo Prati.
- 5 ACTS 066 project OPEN, Optical Pan European Network, led by Alcatel Alsthom Research.
- 6 ACTS 305 project REPEAT, led by Alcatel Alsthom Research.
- 7 Heinrich Hertz Institut, Berlin, and Alcatel Alsthom Research: three-year collaboration under research agreement.

F. Brillouet es el responsable del grupo de Fuentes Integradas, que forma parte del proyecto Módulos de Componentes Ópticos en el Departamento de Sistemas Ópticos del Centro de Investigación Corporativo de Alcatel en Marcoussis, Francia.

F. Devaux es el responsable del grupo de Fotodetectores y Dispositivos de Proceso Ópticos, que forma parte del proyecto Componentes y Módulos Ópticos en el Departamento de Sistemas Ópticos del Centro de Investigación Corporativo de Alcatel en Marcoussis, Francia.

M. Renaud es el responsable del grupo de Componentes para Interconexión y Conmutación, que forma parte del proyecto Componentes y Módulos Ópticos en el Departamento de Sistemas Ópticos del Centro de Investigación Corporativo de Alcatel en Marcoussis, Francia.

GLOSARIO

■ Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM)

En WDM, varias señales (o canales) son transportadas simultáneamente sobre una fibra, pero en diferentes longitudes de onda. Cada canal es, por regla general, Multiplexado por División en el Tiempo (TDM). La capacidad de un sistema WDM está más en función del número de longitudes de onda que por la velocidad del canal TDM. Cuando los canales están estrechamente espaciados (100 GHz o más bajo) se denomina Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa (DWDM). Un espaciado de 100 GHz ha sido estandarizado por la UIT.

■ Amplificación Óptica

Los amplificadores ópticos son utilizados para amplificar las señales ópticas y vienen a ser los equivalentes a los amplificadores electrónicos. Los amplificadores ópticos más habitualmente utilizados están basados sobre fibras ópticas especiales, las cuales son dopadas con erbio (Amplificador de Fibra Dopada con Erblio, o EDFA). La energía se proporciona usando una fuente óptica de muy alta energía (denominada Pump láser). Los EDFAs pueden facilitar altas cotas de amplificación, pero inherentemente producen ruido. La característica más atractiva de los EDFAs es que son transparentes a la velocidad y pueden ser utilizados para diferentes longitudes de onda. Son sin duda una de las más importantes tecnologías para WDM.

■ Regeneración 3R

Con el fin de preservar la calidad de la transmisión sobre largas distancias podría ser necesario reestablecer la señal utilizando la regeneración 3R para la que la señal sea retemporizada, remo-

delada y reamplificada. Esto contrasta con los amplificadores ópticos (como se explica más arriba) los cuales regeneran la señal junto con el ruido. Por esta razón, es habitual referirse a la EDFA como un dispositivo 1R.

■ Redes Ópticas Pasivas y Activas

Las Redes Ópticas Pasivas, o PONS, son redes en las cuales todas las funciones entre la central y el abonado son totalmente pasivas, esto significa que ninguna de las funciones electro-ópticas requiere energía eléctrica. En orden a preservar la seguridad de los abonados se emplean la división de longitud de onda y/o la multiplexación por división de código. En contraste, las redes activas continene equipamiento en los tramos intermedios que requieren energía eléctrica.

■ Redes Totalmente Ópticas

Normalmente, el concepto de redes ópticas se refiere a las redes basadas en fibra que interconectan elementos tales como Transconectores Ópticos (OXC) o multiplexores ópticos de inserción-extracción. Una red óptica no implica necesariamente que los fotones puedan viajar dentro de la red sin realizar la conversión óptico-electrónica pertinente. Sin embargo, cuando este es el caso, la red se denomina Red Completamente Óptica.

■ Multiplexores Ópticos de Inserción/Extracción

Un OADM es un componente de la red que permite un enlace de transmisión WDM para insertar/extraer señales ópticas, sin realizar la conversión de la corriente fotónica en una señal eléctrica. La inserción y la extracción son realizadas por filtros ópticos o demul-

tiplexadores. Un OADM puede ser tanto configurable como no-reconfigurable, en el primero de los casos, se necesita el uso de conmutadores ópticos.

■ Transconector Óptico

Los OXC son hoy día elementos fundamentales de las redes de telecomunicaciones, permitiendo a los operadores gestionar sus redes y cubrir rigurosos objetivos de calidad y servicio. En el caso de las redes ópticas, los transconectores ópticos son funcionalmente requeridos. Frente a un OADM, un OXC tiene varias fibras de entrada, cada una de ellas transportando un canal WDM, y varias fibras de salida que transportan también canales WDM. Tres funciones de transconexión son las más habitualmente consideradas: conmutación de fibra, conmutación de longitud de onda y conversión de longitud de onda.

ABREVIATURAS DE ESTE NÚMERO

A		NRZ	No Retorno a Cero
ABM2	Material Avanzado Amortiguación de Alcatel	NZDSF	Fibra de Dispersión Desplazada Non-Zero
ACTS	Servicios y Tecnologías de Comunicaciones Avanzadas	O	
ADM	Multiplexador Inserción/Extracción	OAAC	Cables Adosados Ópticos Aéreos
ADSL	Bucle de Abonado Digital Asimétrico	OADM	Multiplexor Óptico de Inserción/Extracción
ADSS	Cables auto-soportados Totalmente Dieléctricos	OAM&P	Operaciones de Administración, Mantenimiento y Aprovisionamiento
ALC	Control de Nivel Automático	OAN	Nodo de Acceso Óptico
AN	Nodo de Acceso	O-CDMA	Acceso Óptico Múltiple por División de Código
APOLT	Terminación de Línea Óptica Pasiva ATM	OFA	Amplificador de Fibra Óptica
APON	Red Óptica Pasiva ATM	OFCCC	Centro de Competencia de Cable de Fibra Óptica
APONT	Terminación de Red Óptica Pasiva ATM	ONU	Unidad de Red Óptica
ATM	Modo de Transferencia Asíncrono	OPEN	Red Paneuropea Óptica
B		OPGW	Cable Óptico Enterrado
BB	Banda Ancha	OSC	Canal de Supervisión Óptica
BER	Tasa de Error por Bit	OTDM	Multiplexación Óptica por División de Tiempo
BLSR	Anillo Conmutado de Línea Bidireccional	OXC	Transconector Óptico
C		P	
CATV	Televisión por Cable	PBT	Polibutileno Terafalato
CC	Centro de competencia	PDH	Jerarquía Digital Plesiócrona
CDMA	Acceso Múltiple por División de Código	PMD	Dispersión del Modo de Polarización
CG-SOAs	SOAs de Ganancia Controlada	PON	Red Óptica Pasiva
CO	Central de Oficina	POTS	Servicio Telefónico Básico Tradicional
CP	Instalación de Usuario	Q	
CPN	Red en Instalación de Usuario	QAM	Modulación de Amplitud en Cuadratura
CSM	Miembro Resistente Central	QoS	Calidad de Servicio
CW	Onda Continua	R	
D		RGW	Pasarela Residencial
DCF	Fibra Compensación Dispersión	R-OADM	ADM Óptico Reconfigurable
DFB	Retorno Distribuido	ROL	Depósito Oscilación Invertida
DSF	Fibra con Dispersión Desplazada	RWA	Adaptador de Longitud de Onda de Recepción
DVB	Difusión de Video Digital	RZ	Retorno a cero
DWDM	Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa	S	
DXC	Transconector Digital	SDH	Jerarquía Digital Síncrona
E		SEA-ME-WE 3	Sudeste Asiático-Medio Oriente-Europa Occidental
EDFA	Amplificador de Fibra Dopada con Erblio	SMF	Fibra en Modo Simple
EA	Electro-Absorción	SND	División de Redes Submarinas (Alcatel)
E-OTDR	Extended Optical Time Domain Reflectometry	SNR	Tasa Señal Ruido
ER	Tasa de Extinción	SOA	Amplificador Óptico Semiconductor
ETDM	Multiplexación Eléctrica por División en el Tiempo	SONET	Red Óptica Síncrona
ETSI	Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones	SPM	Modulación en Autofase
F		STS	Señal Síncrona de Transporte
FEC	Corrección de Errores en Recepción	T	
FIT	Fallos en Tiempo	TDM	Multiplexación por División en el Tiempo
FITL	Fibra en el Bucle	TDMA	Acceso Múltiple por División en el Tiempo
FR	Frame Relay	TMN	Red de Gestión de Telecomunicaciones
FSAN	Red de Acceso a Servicios Completos	TWA	Adaptador de Longitud de Onda de Transmisión
FSR	Alcance Espectro Libre	U	
FTTB/Cab	Fibra a edificio/cajetín	UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
FTTH	Fibra en el Hogar	UPSR	Anillo Conmutado de Pasarela Unidireccional
FWM	Mezcla de Cuatro Ondas	UV	Ultravioletas
FXC	Transconector Óptico de Fibra	V	
G		VBR	Velocidad Variable
GVD	Group Velocity Dispersion	VC	Contenedor Virtual
H		VDSL	Línea Virtual de Abonado de muy Alta Velocidad
HFC	Híbrido Fibra/Coaxial	VT	Tributario Virtual
I		W	
ILA	Amplificador en Línea	WAN	Red de Área Amplia
IP	Internet/Protocol	WDM	Multiplexación por División de Longitud de Onda
L		WDMA	Acceso Múltiple por División de Longitud de Onda
LED	Diodo Emisor de Luz	WT-OXC	Transconector Óptico Traducción de Longitud de Onda
LEM	Gestor de Elemento Local	X	
LID	Detección e Inyección Local	XPM	Modulación de Fase Cruzada
LIM	Módulo de Interfaz de Línea	3R	Resincronizado, Reformateado, Retransmitido
LT	Terminación de Línea		
M			
MAN	Red de Área Metropolitana		
MSP	Protección de Sección Múltiple		
M-Z	Mach-Zehnder		
N			
NB	Banda Estrecha		
NGDLC	Portador de Bucle Digital de Próxima Generación		
NM	Gestor de Red		
NPE	Equipamiento de Protección de Red		

OFICINAS EDITORIALES

Cualquier asunto relacionado con las distintas ediciones de la Revista de Telecomunicaciones de Alcatel deberá dirigirse al director adecuado. Las peticiones de suscripción deben enviarse por fax o por correo.

EDICIÓN INGLESA:

Mike Deason
Alcatel Telecommunications Review - Alcatel
54, rue La Boétie 75382 Paris Cedex 08
France
Tel.: 33 (0)1 40 76 13 48
Fax: 33 (0)1 40 76 14 26
E-mail: (ver edición francesa)

EDICIÓN FRANCESA:

Catherine Camus
Revue des Télécommunications d'Alcatel
Alcatel
54, rue La Boétie - 75382 Paris Cédex 08
France
Tel.: 33 (0)1 40 76 13 48
Fax: 33 (0)1 40 76 14 26
E-mail: catherine.camus@alcatel.fr

EDICIÓN ALEMANA:

Andreas Ortelt
Alcatel Telecom Rundschau - Alcatel
Department ZOE/FP
70430 Stuttgart - Germany
Tel.: (49) 711 821 446 90
Fax: (49) 711 821 460 55
E-mail: A.Ortelt@stgl.sel.alcatel.de

EDICIÓN ESPAÑOLA:

Gustavo Arroyo
Revista de Telecomunicaciones de Alcatel
Alcatel
Ramírez de Prado, 5 - 28045 Madrid - Spain
Tel.: (34) 91 330 49 06
Fax: (34) 91 330 50 41
E-mail: gustavo@alcatel.es

EDICIÓN CHINA:

Isabelle Liu
Alcatel China
Beijing Representative Office
2nd & 3rd Floor Landmark Building
8 North Dongsanhuan Road
Chaoyang District
Beijing 100004
P.R. China
Tel: 86 10 65924670
Fax: 86 21 65064265 / 65073784
E-mail: isabelle.Liu@alcatel.com.hk

El próximo número a publicar tratará sobre tecnologías radio para redes inalámbricas