

Tecnología de comunicaciones ópticas a 40 y 100 Gbps

**Diego León Castaño Castaño,
Ferne Amaya-Fernández**

*diegoleon.castano@alfa.upb.edu.co , ferney.amaya@upb.edu.co
Facultad de Ingeniería Informática y Telecomunicaciones,
Universidad Pontificia Bolivariana
Medellín, Colombia*

Resumen

En este artículo se presenta una revisión y análisis del estado de la tecnología de transmisión a 40 y 100 Gbps, que permitirá incrementar la capacidad de las redes y enlaces de alta capacidad actualmente disponibles en las redes de telecomunicaciones. Aunque la tecnología es comercialmente disponible, se espera una transición inicialmente en la red de **backbone** y posteriormente en la red de acceso para satisfacer los crecientes requerimientos de los usuarios y aplicaciones. Se presentan los principales estándares y desarrollos tecnológicos asociados a estas tecnologías. Adicionalmente, se presentan los dispositivos e interfaces desarrollados para soportar estas tasas de bits y el estado del mercado para acoger a estas tecnologías.

Abstract

In this article we present a review and analysis of the state of technology transmission to 40 and 100 Gbps. These technologies allow an increase in the network capacity currently available in telecommunications networks. Although the technology is commercially available, it is expected a transition, initially in the backbone network and afterwards in the access network to meet the growing requirements of users and applications. We present the main standards and technological developments associated with these technologies. Additionally, we present the devices and interfaces developed to support these bit rates and the market conditions to adopt these technologies.

I. Introducción

El surgimiento de tecnologías y aplicaciones que requieren gran ancho de banda, combinadas con el continuo incremento en el tráfico de la red, ha conllevado al diseño e implementación de redes de mayores capacidades. Por esta razón, es fundamental identificar las principales tecnologías que permiten el aumento de mayores tasas de bits ofreciendo una mayor eficiencia espectral.

Actualmente, la tendencia mundial conduce al uso exclusivo de fibra óptica en los segmentos de *backbone* y metropolitano, esto se debe principalmente a su ancho de banda notablemente superior, bajas atenuaciones y mayor inmunidad al ruido electromagnético. Esta tendencia al uso predominante de fibra óptica junto a la capacidad de adaptación que ha tenido Ethernet durante 40 años, le ha permitido convertirse en el estándar dominante tanto en redes de área local como en redes de área amplia, esa capacidad de evolución se debe a sus altas prestaciones técnicas, rentabilidad, alto nivel de conocimiento universal y despliegue. Lo anterior, sumado a las capacidades de las redes de transporte óptico (*Optical Transport Network*, OTN), conforman los pilares de las redes de telecomunicaciones de nueva generación. La importancia de ratificar estándares para 40 y 100 Gbps radica en la reducción de costos, compatibilidad y proliferación de estas tecnologías.

En este artículo se presenta una revisión y análisis del estado de la tecnología de transmisión a 40 y 100 Gbps. En la Sección 2 se abordan los principales efectos de propagación y cómo éstos limitan la tasa de transmisión. En la Sección 3 se presentan los estándares ópticos que permiten la transmisión a 40 y 100 Gbps. En la Sección 4 se presenta la tecnología de transmisión óptica que permite lograr estas tasas de bits, a través del empleo de formatos de modulación avanzados. En la Sección 5 se presentan los dispositivos e interfaces físicas desarrollados para estas velocidades. Finalmente se presentan las conclusiones.

II. Efectos que limitan el desempeño de la fibra óptica

Resulta de crucial importancia estudiar los efectos que limitan el desempeño de la fibra al trabajar con tasas de transmisión de 40 Gbps y 100 Gbps, ya que es fundamental controlar sus impactos. Entre estos efectos se tienen: la dispersión cromática, los efectos no lineales (dispersión Raman, dispersión Brillouin, FWM y SPM) y el efecto de la birrefringencia PMD (*Polarization Mode Dispersion*) [1], que se describen a continuación.

A. Dispersión cromática

La dispersión cromática se debe a la diferente velocidad de propagación de cada una de las componentes en frecuencia que componen un pulso y tiene dos causas [2].

1) Dispersión material

La dispersión causa diferentes velocidades de las componentes espectrales, debido a que el índice de refracción es diferente para diferentes longitudes de onda [3].

2) Dispersión por guía de onda

Se presenta debido a que la distribución de la luz en la sección transversal de la fibra cambia para diferentes longitudes de ondas. De esta forma, las longitudes de onda más cortas están más confinadas en el núcleo de la fibra, mientras que una porción mayor de la potencia óptica a mayores longitudes de onda se propaga en el revestimiento. Esto es debido a que el índice de refracción del núcleo es mayor que el índice del revestimiento. Esta diferencia en la distribución espacial causa un cambio en la velocidad de propagación [4]. Para compensar la dispersión cromática, se agregan al enlace fibras compensadoras de dispersión (*Dispersion Compensating Fiber*, DCF), las cuales se caracterizan por tener un parámetro elevado de dispersión cromática, pero opuesta al del enlace. Otra alternativa de compensación es el uso de FBG (*Fiber Bragg Grating*) o de emplear métodos electrónicos de compensación [2].

B. Efectos no lineales

A continuación se describen los efectos no lineales que mayor incidencia tienen en la propagación de ondas a través de la fibra óptica.

1) Auto-modulación de fase (Self Phase Modulation, (SPM))

Este fenómeno se estudia principalmente en fibras ópticas monomodo y se presenta debido a que el índice de refracción de la fibra tiene una componente dependiente de la intensidad de la señal óptica (efecto Kerr) [5]. Esto produce un desplazamiento de fase proporcional a la intensidad del pulso. Por esta razón, las diferentes partes del pulso sufren diferentes desplazamientos de fase que modifican los efectos de dispersión sobre el pulso [6]. Estas degradaciones se pueden mitigar empleando la técnica de inversión espectral OPC (*Optical Phase Conjugation*) la cual consiste en alojar un elemento conjugador óptico en la mitad del enlace de fibra [7].

2) **Dispersión estimulada Raman (Stimulated Raman Scattering, SRS)**

Es un fenómeno en el cual se produce una transferencia de potencia de una señal de mayor frecuencia a una de menor frecuencia cuando se introducen sobre una misma fibra dos o más señales con diferente longitud de onda. Para evitar esto, se puede reducir al máximo el espacio entre canales, no se debe superar la potencia umbral, o se puede utilizar la técnica de inversión espectral [8].

3) **Dispersión estimulada de Brillouin (Stimulated Brillouin Scattering, SBS)**

Efecto por el cual la luz dispersada se somete a un cambio de frecuencia como resultado del desplazamiento Doppler causado por la velocidad de las ondas sonoras. Este fenómeno es llamado *estimulado* porque las ondas sonoras pueden ser generadas por las ondas de luz, una vez que la energía de la onda de luz se incrementa más allá de un nivel crítico [9]. Este fenómeno se puede reducir de varias formas: aumentando el ancho espectral de la onda incidente para disminuir la ganancia de Brillouin, no se debe superar la potencia umbral, incrementando el nivel de potencia umbral lo cual se logra haciendo modulación de fase de la portadora o empleando modulación directa en vez de externa, ya que esto provoca un ensanchamiento del espectro de modulación [10].

4) **Mezcla de cuatro ondas (Four Wave Mixing, FWM)**

Este fenómeno produce la aparición de señales con frecuencias que son la combinación lineal de las longitudes de onda de las señales transmitidas. Esto se debe a la dependencia con la intensidad del índice de refracción cuando se transmiten dos o más señales con distinta longitud de onda sobre un mismo canal [11]. Para evitar esto, se pueden emplear fibras dispersivas para aumentar la desadaptación de fases del proceso no lineal también se usan NZ-DSFs (*Non-Zero Dispersion-Shifted Fibers*) que están diseñadas para evitar simultáneamente los efectos dispersivos y no lineales, o se puede usar la técnica de inversión espectral [12].

5) **Modulación cruzada de fase (Cross-Phase Modulation, XPM)**

Produce un desplazamiento de fase debido a que el índice de refracción depende de la intensidad de la onda y de cualquier otra que se propague junto a ella. Por lo tanto, las diferentes partes del pulso sufren diferentes desplazamientos de fase, que modificará los efectos de dispersión sobre el pulso. Este efecto ocurre entre varias longitudes de onda. Este fenómeno se puede evitar utilizando fibras de dispersión desplazada, o aumentando el espacio entre canales [13].

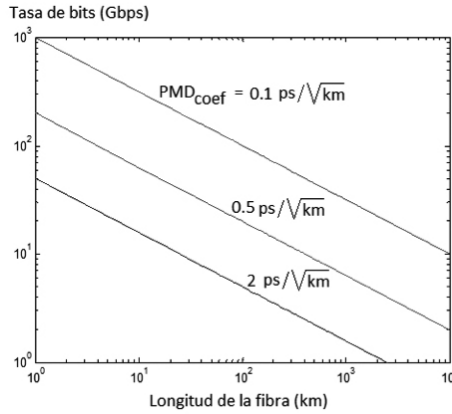
C. Birrefringencia (PMD)

La birrefringencia es el cambio en el índice de refracción “ n ” en los ejes transversales de la fibra, donde los campos se propagan a una velocidad determinada por el índice de refracción. Este efecto induce un retardo entre los modos de polarización conocido como DGD (*Differential Group Delay*). Dado que los pulsos viajan a distinta velocidad, llegan en diferente tiempo al final de la fibra produciendo un ensanchamiento del pulso óptico total. El DGD es medido en picosegundos (ps) y denotado comúnmente como “ τ ” [14].

Las causas de la birrefringencia son la anisotropía y la pérdida de la geometría circular del núcleo de la fibra. La pérdida de la geometría circular de la fibra se debe a esfuerzos en el proceso de fabricación e instalación o a contracciones y dilataciones, por causa de cambios en temperatura, tensiones, curvaturas, etc. [14]. Estudios han demostrado que si se midiera el valor del DGD a la salida de una fibra óptica de longitud considerable, es posible demostrar que el DGD varía en forma aleatoria con distribución de densidad de probabilidades del tipo “maxwelliana” [14]. La ITU-T (Unión Internacional de Telecomunicaciones) recomienda que el DGD no supere el 30% de la ranura temporal de un bit para tener una penalidad menor de 1 dB.

La birrefringencia produce PMD, que ocurre cuando las dos componentes de polarización viajan con distinta velocidad de grupo, llegando en distintos tiempos al final de la fibra; esto produce ensanchamiento de los pulsos ópticos transmitidos provocando interferencia entre símbolos y el aumento de la tasa de bit erróneo (*Bit Error Rate*, BER) [15]. El porcentaje de ensanchamiento del pulso incrementa al aumentar la tasa de transmisión (ver Fig. 1. [14]). Para compensar este efecto, se usan fibras PM Hi-Bi (*Polarization Maintaining Highly Birefringent*) y arreglos de elementos altamente birrefringentes que alteran la polarización, dependiendo de un circuito de control que censa el estado de polarización de la fibra óptica [16].

Fig. 1. Tasa de bits en función de la longitud de la fibra para diferentes coeficientes PMD [17].



La relación entre la máxima tasa de bits R y la máxima longitud de la fibra L , considerando el efecto PMD, es la siguiente:

$$R \cdot PMD_{COEF} \frac{\sqrt{L}}{0.1} < 1, \quad (1)$$

donde el coeficiente PMD_{COEF} es un parámetro especificado por el fabricante de la fibra óptica. Este parámetro tiende a aumentar con el tiempo debido a cambios de temperatura, curvatura y paso del tiempo.

La Fig. 1. ilustra la relación entre la máxima tasa de bits y la longitud de la fibra para diferentes valores de coeficiente PMD asociado a la fibra óptica. El efecto PMD limita el máximo alcance de la fibra óptica a tasas de 40 y 100 Gbps.

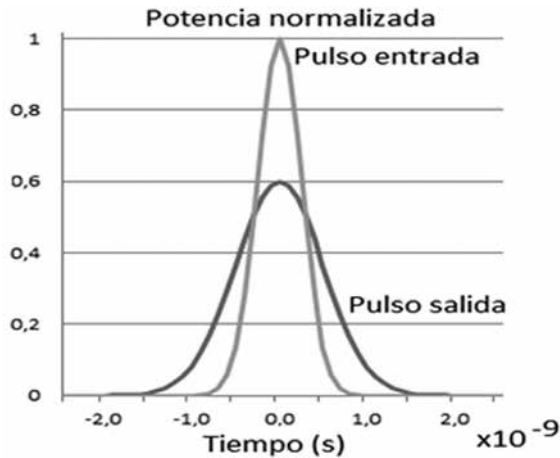
El valor de PMD máximo se relaciona con el tiempo de bit mediante la siguiente ecuación [14]:

$$PMD_{COEF} \frac{<1}{10} Tb \quad (2)$$

Siendo Tb el tiempo de bit.

La Fig. 2. es el resultado de una simulación en la cual se introdujo un pulso gaussiano en una concatenación de 50 segmentos birrefringentes, orientados en forma aleatoria y distribuidos uniformemente entre 0 y 2π con polarización vertical, de ancho RMS inicial τ_0 de 100 ps, de amplitud unitaria y centrado en 0 rad/s [14].

Fig. 2. Pulso a la entrada y a la salida de una fibra óptica después de varios segmentos birrefringentes [14].



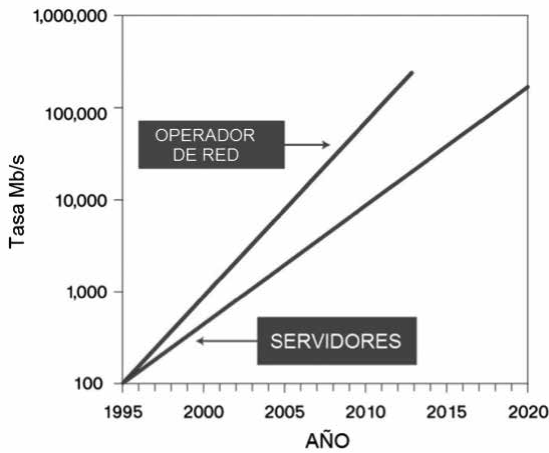
El resultado de dicha simulación evidencia el ensanchamiento de los pulsos ópticos a medida que se incrementa la tasa de transmisión y la longitud de la fibra. Es importante resaltar la pérdida de potencia que sufre el pulso en función de la longitud de la fibra óptica [14].

III. Estandarización de enlaces ópticos a 40 y 100 Gbps

Las principales fuerzas que han incentivado el desarrollo de nuevos estándares Ethernet a tasas superiores de 10 Gbps son principalmente el creciente número de solicitudes y tecnologías de virtualización en los centros de datos, el tráfico intensivo por parte de los proveedores de servicio de red, servicios convergentes de red, video bajo demanda por los usuarios y las redes sociales [18].

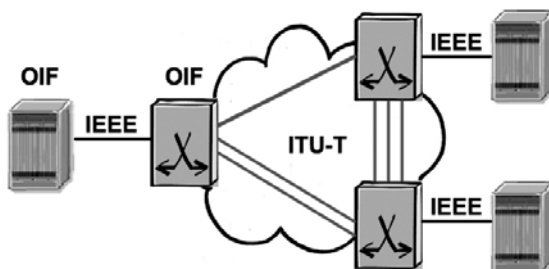
La necesidad de estandarizar dos tasas de transmisión (40 y 100 Gbps) y no solo una, como era de costumbre en la IEEE, surgió porque las exigencias en el volumen de tráfico que generan los servidores y las redes de los operadores aumentan a ritmos distintos. Mientras que en los servidores el tráfico se duplica cada 24 meses, en las redes de los operadores el tráfico se duplica cada 18 meses [16], ver Fig. 3.

Fig. 3. Proyección del volumen de tráfico entre servidores y redes. [19]



Los principales organismos de estandarización que hacen parte en el desarrollo de tecnologías y estándares de comunicaciones a 40 y 100 Gbps son: IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), ITU (International Telecommunication Union) y OIF (Optical Internetworking Forum). Para determinar la actividad que cada uno de estos organismos realiza en el desarrollo de tecnologías y estándares a 40 y 100 Gbps, nos apoyaremos en la Fig. 4 [20].

Fig. 4. Distribución de las actividades del estándar 802.3ba.



IEEE trabaja en el transporte de información sobre Ethernet para las redes de área local y de acceso, a 40 y 100 Gbps. El grupo de trabajo HSSG (Higher Speed Study Group) perteneciente al grupo IEEE 802.2, discutió múltiples tasas de bits para el estándar 802.3ba, incluyendo 40, 80, 100 y 120 Gbps. Luego de varios meses de investigación el HSSG llegó a la conclusión de que tanto 40 como 100 Gbps debían ser implementadas. Los estándares de IEEE alrededor de 40 y 100 Gbps son: 40 Gigabit Ethernet y 100 Gigabit Ethernet [21].

La OIF (Optical Internetworking Forum) se encarga de habilitar la señalización para los backplanes y la comunicación entre chips. También es responsable a través de acuerdos establecidos por sus miembros de especificar los módulos ópticos para los sistemas DWDM a 100 Gbps. Estos acuerdos abarcan los módulos transceptores, tecnología FEC (*Forward Error Correction*) y todo lo relacionado con las características técnicas y mecánicas de dichos módulos [22]. Dentro de la OIF (*Optical Internetworking Forum*) el grupo de trabajo PLL (*Physical and Link Layer*), trabaja en la integración de dichas señales sobre tecnologías DWDM para redes de área metropolitana (MAN) y redes de área amplia (WAN) [18]. Es importante aclarar que el OIF no es un organismo de estandarización, por lo tanto no produce estándares. La misión del OIF es crear acuerdos de implementación (*Implementation Agreements*) los cuales facilitan las labores de evaluación de las propuestas y aceleran la velocidad de incorporación de las innovaciones en los estándares [23]. Los acuerdos de implementación de OIF relacionados con las CEI (*Common Electrical Interfaces*), los cuales especifican las interconexiones chip a chip y en *backplanes* (placas base) para interfaces de alta velocidad, incluyendo SONET/SDH, OTN (G.709) y Ethernet, están cobijadas en el acuerdo CEI-02.0 y se especifican a continuación [23].

- CEI-6G-SR: 6 Gigabit corto alcance, 4.976 a 6.375 Gbps, 0 a 200 mm de circuito impreso y un conector.
- CEI-6G-LR: 6 Gigabit largo alcance, 4.976 a 6.375 Gbps, 0 a 1 metro de circuito impreso y dos conectores.
- CEI-11G-SR: 11 Gigabit corto alcance, 9.95 a 11.1 Gbps, 0 a 200 mm de circuito impreso y un conector.
- CEI-11G-LR: 11 Gigabit largo alcance, 9.95 to 11.1 Gbps, 0 a 1 metro de circuito impreso y dos conectores.

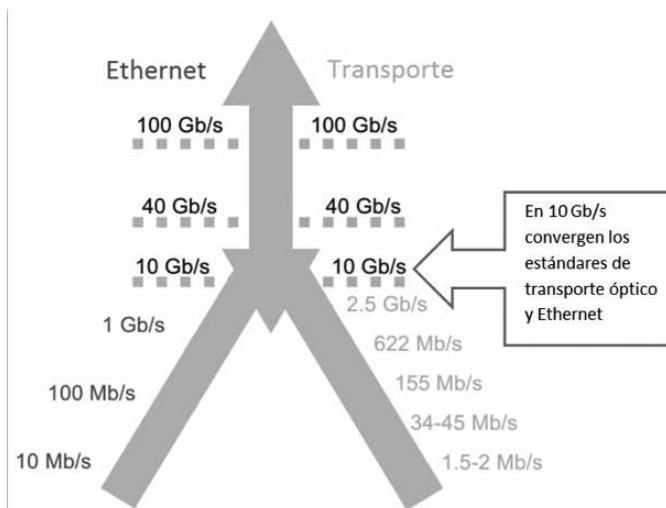
La ITU-T define el estándar para la red de transporte óptico (*Optical Transport Network*, OTN) enfocándose en el apalancamiento de la especificación IEEE 802.3ba y en el despliegue de OTN a 100 Gbps. La ITU busca satisfacer los requerimientos de ancho de banda, disminuir la complejidad de los sistemas actuales y reducir los costos a través de la eficiencia espectral; en otras palabras, la ITU-T tiene como función garantizar que las tasas de transmisión de 40/100 Gbps puedan ser transportadas a través de redes OTN [18]. Las principales recomendaciones de la ITU-T alrededor de 40 y 100 Gbps son: G.709, G.872 y G.798, las cuales definen OTN como la nueva generación de tecnologías de transmisión digital. La recomendación G.709 busca que los operadores preparen sus infraestructuras de red de servicios múltiples basada en tráfico IP a través de un método estandarizado de transporte transparente de servicios sobre longitudes de onda ópticas en sistemas DWDM [21]. La recomendación G.872 define la capa de redes que soporta la gestión de la red y funcionalidades de



supervisión [24]. La recomendación G.798 define las características de los bloques funcionales del equipo de la jerarquía de la red de transporte óptica, especifica tanto los componentes como la metodología que deberían ser usados para hacer hincapié en las funcionalidades de los elementos de red de las redes de transporte óptico [25].

OTN representa la futura plataforma para el intercambio de toda clase de información digital ya que son únicas en la industria con la capacidad de soportar señales Ethernet a 10/40/100 Gbps por encima de SONET/SDH. Esta característica ha convertido a OTN en el *backbone* de las redes de nueva generación [26]. La actividad alrededor del despliegue de 100 Gbps busca la convergencia entre los estándares de transporte óptico y Ethernet, proceso que se inició en 10G ver Fig. 5.

Fig. 5. Convergencia entre Ethernet y OTN comienza a partir de 10 Gb/s.



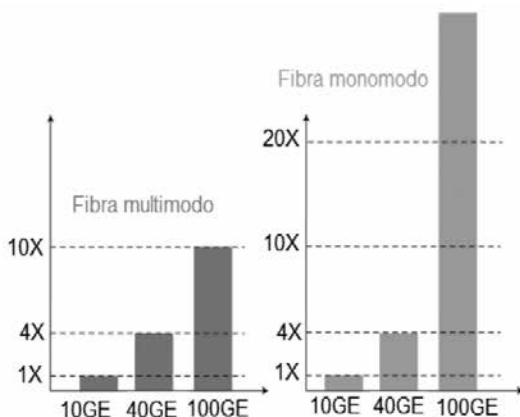
El fundamento previamente señalado que establece la tendencia a la convergencia entre los estándares de transporte óptico y Ethernet se argumenta en el hecho de que hoy en día, se estima que más del 90% de las redes LAN del mundo trabajan sobre Ethernet, consolidándose como el estándar predominante tanto en las redes de área local (LAN) como en las redes de área amplia (WAN), desplazando tecnologías tradicionales como *Frame Relay*, *DQDB (Distributed Queue Dual Bus)* y *ATM (Asynchronous Transfer Mode)* [27]. Este fenómeno se debe a sus altas prestaciones técnicas, a su rentabilidad, producto de su economía de escala, el alto nivel de conocimiento universal y su despliegue [28]. Estudios de mercado revelan que en 5 años será la tecnología predominante en la transmisión de larga distancia [29].

En cuanto a su arquitectura, Ethernet ha sufrido cambios radicales; entre ellos, está la desaparición del mecanismo de control de acceso al medio CSMA/CD producto del cambio en su modo de transmisión half-duplex, para dar paso a enlaces dedicados full-duplex. En segunda instancia, Ethernet ha ampliado su escala o rango de cobertura gracias a las velocidades con las que opera, ya que tasas de transmisión de 1 y 10 Gbps hacen de este estándar una alternativa de bajo costo, escalable y sencilla, ideal para crear redes metropolitanas (MAN) e incluso redes WAN [28]. Esto supone un cambio drástico en los medios de transmisión tendiente al uso absoluto de fibras ópticas.

En las redes actuales el tráfico de la capa de distribución y de core (núcleo) esta soportado sobre enlaces de 10 Gbps. Con la adopción del estándar 802.3ba, se busca aumentar dicha tasa a 40 Gbps, dejando los enlaces de 10 Gbps para la capa de acceso, esto representa el siguiente paso en la evolución de los centros de datos [30]. La capacidad de escalabilidad y migración que tiene Ethernet hacia implementaciones futuras se debe a su configuración en la trama de capa dos, que prácticamente ha permanecido íntegra desde sus inicios. La capa física, los métodos de acceso al medio y el control del medio han progresado y continúan haciéndolo. Sin embargo, el encabezado de la trama ha permanecido invariable en términos generales [31] lo cual representa una ventaja en términos económicos, ya que le permite a las empresas prolongar la inversión realizada.

El hecho de que se hayan implementado dos tasas de transmisión conlleva a los administradores de TI a preguntarse cuál sería la mejor ruta de evolución, si migrar directamente a los 100 Gbps o si dar un paso intermedio en 40 Gbps. Es importante considerar que 40 Gigabit Ethernet (GbE) proporciona flexibilidad en diseño y tiene un costo inferior a 100 Gigabit Ethernet [19] ver Fig. 6.

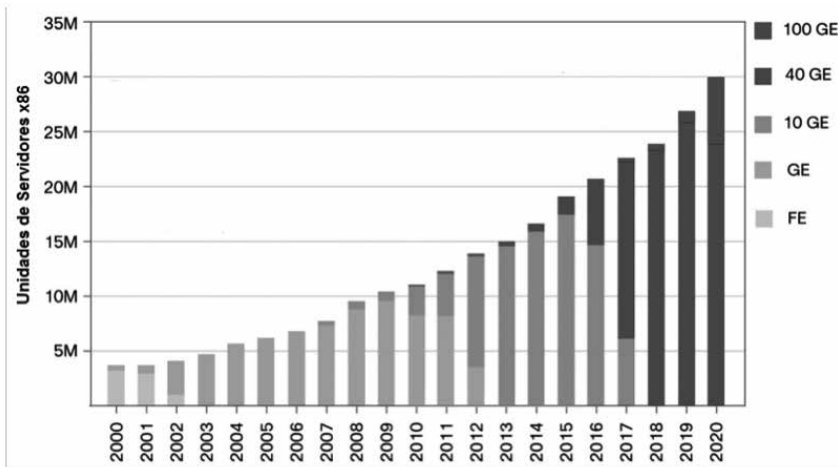
Fig. 6. Comparación de costos de fibras monomodo y multimodo para 40 y 100 Gigabit Ethernet. [19]



El factor económico resulta determinante para empresas que requieran gran ancho de banda y no posean el dinero suficiente para realizar una migración directa hacia 100 GbE. Sin embargo, John D'Ambrosia, líder en la industria del desarrollo de tecnologías Ethernet desde 1999, afirma que las fibras ópticas para enlaces de 40/100 Gbps son elevadas, sin embargo estos costos están por debajo de las implementaciones iniciales de 10 Gigabit Ethernet. Empresas como Extreme Networks están cotizando módulos para conmutadores Ethernet de 40G a 1000 dólares por puerto, ligeramente más costoso que un puerto Ethernet de 10G [32].

La adopción a gran escala de 100 Gigabit Ethernet tomará una cantidad de tiempo considerable (Ver Fig. 7.), esto le permitirá a los administradores y CIO (*Chief Information Officer*) planear sus estrategias de migración, para entonces, estos deberán revisar exhaustivamente y minimizar los gastos de operación (OPEX) y costo total de propiedad (TCO), factores decisivos a la hora de escoger alguna de las dos alternativas.

Fig. 7. Proyección de mercado para 40 y 100 Gigabit Ethernet. [19]



El estándar 40/100 Gigabit Ethernet abarca una serie de especificaciones de capa física, las cuales son resumidas y presentadas en la Tabla I.

Tabla I. Especificaciones de capa física para 40 y 100 gigabit ethernet [33] [34] [35]

Especificaciones Capa Física	1 m Backplane o placa de circuito	7 m en cable de cobre	100 m OM3 125 m OM4 MMF (Fibra multimodo)	10 Km SMF (Fibra monomodo)	40 km (Fibra monomodo)
Aplicaciones objetivo para 40 Gigabit Ethernet: servidores, centros de datos, campus, redes MAN y backbone.					
Nombre	40GBASE -KR4	40GBASE -CR4	40GBASE -SR4	40GBASE -LR4	
Eléctrico/ Óptico	Eléctrico, Backplane	Eléctrico	Óptico	Óptico	
Medio	Backplane de cobre	Cable Twinax , Coaxial Paralelo	MPO MMF	SMF duplex	
Modulo/ Conector	Backplane de cobre	Módulo QSFP, interfaz CX4	Módulo QSFP	Módulo QSFP, interfaz CFP	
Tasa de transmisión	40 Gbps	40 Gbps	40 Gbps	40 Gbps	
# de canales	4	4	4	4	
Señalización	4 x 10.3125 Gbps	4 x 10.3125 Gbps	4 x 10.3125 Gbps	4 x 10.3125 Gbps	
Longitud de Onda	N/A	N/A	850 nm	1310 nm	

Aplicaciones objetivo para 100 Gigabit Ethernet: centros de datos, campus, redes MAN, backbone y redes WAN.					
Nombre		100GBASE -CR10	100GBASE -SR10	100GBASE -LR4	100GBASE -ER4
Eléctrico/ Óptico		Eléctrico	Óptico	Óptico	Óptico
Medio		Cable Twinax	MPO MMF	SMF duplex	SMF duplex
Modulo/ Conector		Módulo QSFP, interfaz CX4	Módulo CXP y Modulo CFP	Módulo CFP	Módulo CFP
Tasa de transmisión		100 Gbps	100 Gbps	100 Gbps	100 Gbps
# de canales		10	10	4	4
Señalización		10 x 10.3125 Gbps	10 x 10.3125 Gbps	4 x 25.78125 Gbps	4 x 25.78125 Gbps
Longitud de Onda		N/A	850 nm	1310 nm	1310 nm

El cableado para 40 y 100 Gigabit Ethernet puede ser en fibra o en cobre y el alcance o longitud de ese enlace está determinada por la calidad y tipo de cable y del transceptor a utilizar.

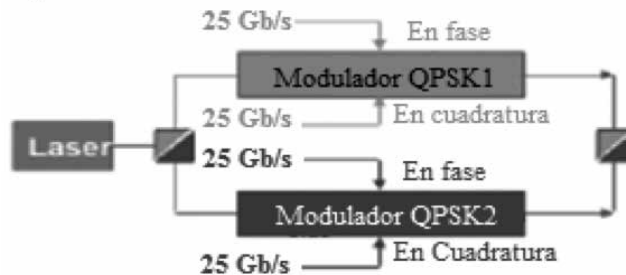
IV. Transmisión y Recepción a 100 Gbps

El constante incremento del tráfico en las redes Ethernet ha generado en el medio la necesidad de incrementar la capacidad de las redes de transporte sobre este protocolo a 100 Gb/s (100 GbE), debido a esto la comunidad científica internacional, luego de múltiples investigaciones, concluyó que la solución para esta problemática es el esquema de modulación DQPSK (*Differential Quadrature Phase Shift Keying*) con multiplexación por polarización (*Polarization Multiplexing*, PM) sobre fibra óptica monomodo, empleando RZ (*Return to Zero*), ya que esta combinación permite realizar transmisiones de mayor distancia, reduce la dispersión cromática y la dispersión por modo de polarización (PMD) [36], [37].

El diagrama del modulador PM-DQPSK a 100 Gbps se presenta en la Fig. 8. El primer elemento del transmisor es un láser de onda continua (*Continuous Wave*, CW), es decir, un láser que teóricamente tiene frecuencia y amplitud constante. La señal del láser es dividida por un PBS (*Polarization Beam Splitter*) que separa las dos

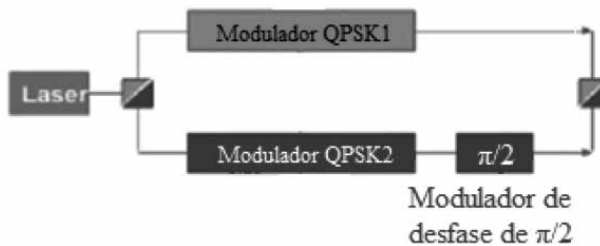
componentes de polarización. Cada componente de polarización entra a un modulador QPSK, que modula las componentes en fase y cuadratura, generando en cada componente de polarización una señal óptica modulada a 50 Gbps. Posteriormente las dos señales son mezcladas empleando un PBC (Polarization Beam Combiner). Se observa que la máxima tasa de bits empleada en el dominio eléctrico es de 25 Gbps. En el dominio óptico esto disminuye los efectos ópticos.

Fig. 8. Diagrama del modulador PM-DQPSK [38]



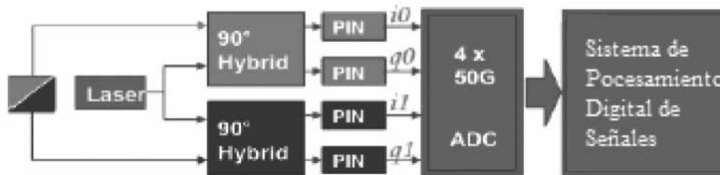
El modulador QPSK es un modulador en cuadratura en el dominio óptico como se presenta en la Fig. 9. Posee una señal de entrada óptica y las entradas eléctricas con las componentes en fase y cuadratura. Está compuesto por dos moduladores MZM (*Mach Zehnder Modulator*) y un modulador en fase que realiza un desfase fijo de 90° . Aunque en el montaje se utiliza un dual-paralelo MZM, se ha demostrado que si se va a codificar la señal con retorno a cero, se puede utilizar un transmisor MZM simple que permita modular DQPSK con el fin de reducir esfuerzos en el hardware, ya que algunos investigadores demostraron que con este tipo de codificación un transmisor MZM simple, un MZM serial y un MZM paralelo, sometidos a diferentes factores de *roll-off* se comportan muy similarmente [39]. La misma investigación concluyó que para el caso de la codificación no retorno a cero, el modulador MZM paralelo genera menor BER (*bit error rate*), disminuye la dispersión cromática y es más tolerante a las no linealidades.

La señal emitida por el transmisor puede ser amplificada por un EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) y transmitida por una fibra mono-modo, luego puede ser amplificada nuevamente antes de ser procesada en el receptor.

Fig. 9. Diagrama del modulador MZM de desfase de $\pi/2$. [38]

El demodulador PM-QPSK se presenta en la Fig. 10. La señal recibida llega a un PBS que separa las dos componentes de polarización. Cada componente es demodulada en cuadratura para obtener las componentes en fase y cuadratura. Esta demodulación es coherente, por lo que se requiere mezclar la señal recibida con un oscilador local, lo cual se realiza empleando un dispositivo conocido como 90° Hybrid. Las componentes en fase y cuadratura en el dominio óptico son convertidas al dominio eléctrico empleando fotodetectores tipo PIN. Posteriormente, la señal es digitalizada empleando 4 ADCs (*Analog to Digital Converters*) y posteriormente la señal va a un sistema de procesamiento digital de señales que realiza la compensación y la detección de los bits recibidos.

Fig. 10. Demodulador PM-QPSK. [38]



Para el caso del ejemplo se utilizan señales pseudoaleatorias a 25 Gb/s.

V. Componentes, dispositivos y Mercado en redes a 40 y 100 Gbps

El estándar 802.3ba especifica una amplia gama de arquitecturas de redes extensibles adaptables a tasas de 40 y 100 Gbps, además de una diversidad de medios de transmisión. Estas arquitecturas flexibles están concebidas para ser rentables y

vigentes, ya que están proyectadas de tal forma que las infraestructuras actuales convivan con las futuras sin necesidad de modificar el estándar, esto les permite a los fabricantes, consumidores y proveedores de servicio la reutilización de la tecnología y la propiedad intelectual [40].

Desde que el estándar IEEE 802.3ba fue ratificado el 17 de junio de 2010, muchos fabricantes comenzaron a anunciar y a comercializar sus productos. Según Infonetics, firma dedicada a la consultoría e investigación de mercados de la industria de las comunicaciones, las cinco principales compañías con la mayor participación en el mercado de equipos de conmutación (*switching*) y enrutamiento (*routing*) al primer trimestre de 2012 son: Cisco, Huawei, Alcatel-Lucent, Juniper, y ZTE, ver Fig. 11.

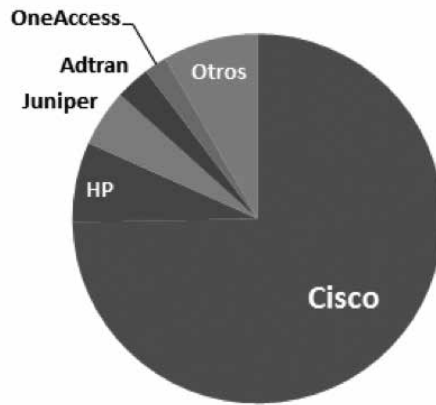
Fig. 11. Principales vendedores de equipos de conmutación y enrutamiento en el mundo. [41]



Cisco, al igual que otros fabricantes de dispositivos de red, están ampliando su portafolio de productos hacia tasas de 40 y 100 Gbps, esto con el fin de satisfacer principalmente las demandas de computación en la nube, video en alta definición y el creciente tráfico generado por el uso de los dispositivos móviles. Cisco continúa dominando el mercado mundial de conmutadores y enrutadores corporativos con un margen del 62.1%, aproximadamente, mientras que compañías como Alcatel-Lucent, Juniper y Huawei disputan apretadamente el segundo lugar. Ver Fig. 11. [42].

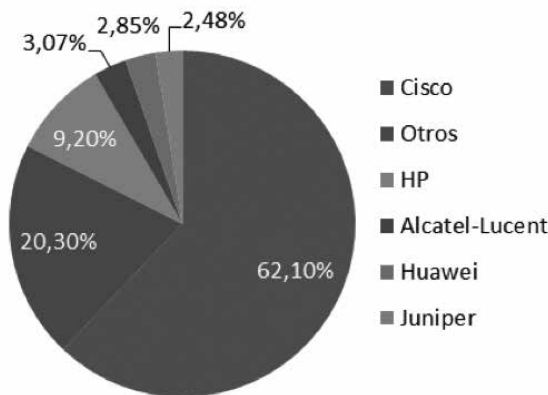
Separando ambos mercados (conmutadores y enrutadores), se encuentra que las cinco empresas con más ganancias en el mercado de enrutadores son: Cisco, HP, Juniper, Adtran y OneAccess. Ver Fig. 12.

Fig. 12. Top5 de las empresas líderes en el mercado de los enrutadores en el 2012. [43]



Para el mercado de conmutadores se encuentra que los cinco fabricantes o vendedores más importantes de este segmento son: Cisco, HP, Alcatel-Lucent, Huawei y Juniper. Ver Fig. 13.

Fig. 13. Los cinco principales proveedores de conmutadores Ethernet capa 2 y 3. [44]



El gran comportamiento que ha tenido el mercado de los conmutadores y enrutadores Ethernet demuestra la importancia de estos dispositivos en el despliegue de infraestructuras de TI. El último reporte hecho por Infonetics indica que el mercado de enrutadores y conmutadores para el segmento de los proveedores de servicio ha generado 3.5 billones de dólares en el segundo cuatrimestre del 2012 [42]. Según

reporta Dell'Oro Group, se espera que la venta de conmutadores 10GbE alcancen los 13 billones de dólares para el 2016, mientras que 40/100 GbE los 3 billones de dólares.

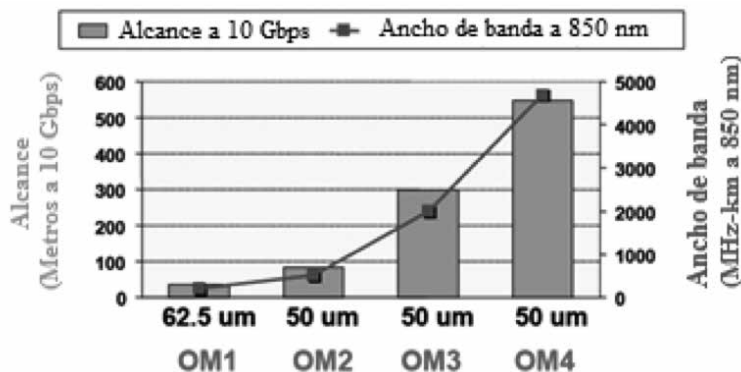
Shashi Kiran, director de marketing del grupo de soluciones de centros de datos de Cisco, afirma que dicha compañía posee el 73% del mercado de conmutadores de 10 Gigabit Ethernet. La demanda de conmutadores con mayores tasas de transmisión aumentará paralelamente con la carga de trabajo intensivo que soportan los centros de datos. El señor Kiran afirma que una de las principales funciones que deben tener los conmutadores de nueva generación es la de optimizar el ancho de banda mitigando los cuellos de botella en las redes de acceso [45].

Para el sector de los centros de datos que operan a 40 y 100 Gbps es recomendable el uso de fibras OM3 y OM4 ya que esta configuración es más flexible que las basadas en cobre y en términos de costo está por debajo de las fibras monomodo.

Las fibras OM3 y OM4 se diseñaron con el fin de sacar el máximo rendimiento a las fuentes tipo VCSEL (*Vertical Cavity Surface Emitting Laser*) en comparación con LEDs. Aunque la fibra OM2 es compatible con VCSEL, no se considera optimizada para láser, ya que en comparación con OM4, la fibra OM2 tiene un alcance de 550 metros a 1 Gb/s, y 82 metros a 10 Gb/s, mientras que la fibra OM4 tiene un alcance de 1000 metros a 1 Gb/s y 550 metros a 10 Gb/s soportando aplicaciones tales como Ethernet, FibreChannel y OIF. En la Fig. 14. se presentan las principales características de las fibras multimodo empleadas a 40 y 100 Gbps.

Las fibras multimodo son las soluciones más rentables para las aplicaciones de corto alcance en los centros de datos y redes de área local, convirtiéndose en una alternativa ampliamente usada para sortear los costos de las fibras monomodo [46].

Fig. 14. Comparación del alcance y ancho de banda de las fibras OM1, OM2, OM3 y OM4. [47]



Los módulos ópticos no están estandarizados por un organismo de estandarización oficial, pero están definidos bajo *Multi-Source Agreement* (MSA). Los MSA son una agrupación de desarrolladores y fabricantes de la industria tecnológica que buscan crear módulos que satisfagan las exigencias técnicas y de mercado, haciéndolos escalables e interoperables.

Como cualquier tecnología de nueva generación, uno de los principales objetivos es la prolongación de la tecnología existente. Esto es posible minimizando el número de nuevas interfaces e incrementando su simplicidad. Esta combinación permite que los costos de los módulos se reduzcan gracias a los volúmenes de producción. Solo tres módulos cumplieron con las consideraciones anteriores y son los que se utilizan en la primera generación de 40 y 100 Gigabit Ethernet [43], estas interfaces se detallan a continuación.

A. C form-factor pluggable (CFP)

Este transceptor fue creado principalmente para la transmisión de señales a altas velocidades y larga distancia, más específicamente para 100 Gbps y más de 100 m. Este módulo es usado para 40GBASE-SR4, 40GBASE-LR4, 100GBASE-SR10, 100GBASE-LR4, y 100GBASE-ER4.

Existen dos configuraciones para este transceptor, una eléctrica y una óptica [48].

La conexión óptica soporta dos configuraciones, la primera es el uso de 10 líneas a 10 Gbps y la segunda es el uso de 4 líneas a 25 Gbps.

La conexión eléctrica soporta 10 líneas a 10 Gbps tanto en transmisión como en recepción.

B. Quad Small Form-factor Pluggable (QSFP o QSFP+)

Este transceptor funciona como un intermediario entre dispositivos de conmutación, enrutamiento y el medio de transmisión que en la mayoría de veces suele ser fibra óptica. Este transceptor está diseñado para soportar estándares de comunicaciones como: Serial Attached SCSI, 40G Ethernet y 20G/40G Infiniband. Este transceptor, a diferencia del CFP, funciona para distancias más cortas, soportando interfaces ópticas y eléctricas de bajo consumo de potencia. Este módulo es usado para aplicaciones que incluyen 40GBASE-CR4, 40GBASE-SR4 y 40GBASE-LR4. Este módulo es el recomendado para 40 Gigabit Ethernet debido a su tamaño y bajo precio [40].

C. CXP

Es un sistema de conectores de cobre capaz de proveer 12 enlaces a 10 Gbps, ideal para el estándar 100 Gigabit Ethernet, también permite tener tres canales 40 Gigabit Ethernet. Al igual que el QSFP este módulo está diseñado para aplicaciones de centros de datos de corto alcance. Este conector es muy compacto pero no es capaz de disipar la potencia de los módulos de larga distancia, este módulo fue diseñado para trabajar con una configuración de 24 fibras multimodo en paralelo. Los módulos CXP son usados para 100GBASE-CR10, 100GBASE-SR10 [40].

D. Conectores MTP y MTO

Uno de los avances importantes que trajo el estándar 802.3ba en términos de cableado es el uso de múltiples fibras por canal, para esto el estándar se apoyó en tecnologías ópticas paralelas, este tipo de transmisiones están fundamentadas en la multiplexación por división espaciada en la cual una señal es dividida y transmitida sobre múltiples fibras independientes simultáneamente [49], los fragmentos de la señal dividida deben llegar al receptor al mismo tiempo para que de esta manera se trate de reconstruir la señal original [50].







El resultado del uso de estas tecnologías ópticas condujo al desarrollo de dos tipos de conectores llamados MPO y MTP. Ambos conectores se utilizan sobre fibras multimodo y tienen la capacidad de acomodar hasta 72 fibras en espacios tan reducidos como el RJ45 [50].

El conector MTP es un conector MPO mejorado, ya que tiene mejor desempeño mecánico y óptico y es compatible con todas las instalaciones de MPO [51]. El conector MPO es un término genérico para conectores definidos por las normas IEC-61754-7 y TIA-604-5, mientras que el MTP, que también cumple con estas normas, es marca registrada de US Conec Ltd.

Para tasas de transmisión de 10 Gbps la transmisión se realiza de forma serial; es decir, por una fibra se transmite y por otra se recibe; sin embargo, para tasas de transmisión mayores a 10 Gbps la comunicación pasa de ser serial a paralela, obteniendo como resultado dos configuraciones: una para 40 Gigabit Ethernet y otra para 100 Gigabit Ethernet.

Para el caso de 40 Gigas, se trasmite por 4 hilos y recibe por otros 4 hilos, y para el caso de 100 Gigas, se trasmite por 10 hilos y se recibe por los otros 10 hilos restantes.

TABLA II. Esquema y configuración de los conectores mtp y mto. [19]

TASA DE TRANSMISION	10 Gbps	40 Gbps	100 Gbps
Tipo de laser	VCSEL	VCSEL Array	VCSEL Array
Tipo de fibra	OM3	OM3 y OM4	OM3 y OM4
Tipo de conector	LCx2	MPO	2x12f MPO / 1x24f MPO
# de fibras	2	12	24
Esquema			
			

A partir de la tabla anterior podemos concluir que la configuración para 40 Gigabit Ethernet consta de 8 canales de 10 Gigabit Ethernet en paralelo, 4 para transmitir y 4 para recibir. Las fibras 1, 2, 3, 4 (de izquierda a derecha) resaltadas en rojo se usan para transmitir, mientras que las fibras 9, 10, 11, 12 resaltadas en verde se usan para recibir. Las fibras restantes no se usan.

Para 100 Gigabit Ethernet tenemos dos configuraciones: la primera consta de 24 fibras en un mismo conector, 10 para transmisión y 10 para recepción. Para la segunda configuración tenemos dos conectores cada uno con 12 líneas, de las cuales solo 10 se utilizan, ya sea para transmisión o recepción donde cada línea trabaja a una tasa de 10 Gbps. Los puntos negros representan las fibras o canales que no se utilizan.

VI. Conclusiones

El trabajo en conjunto que vienen desarrollando la IEEE, ITU-T y la OIF, representa el siguiente paso en la evolución de las redes de telecomunicaciones actuales hacia tasas de 40 y 100 Gbps, permitiendo superar la tasa de 10 Gbps, cumpliendo con

los requerimientos de las futuras redes de telecomunicaciones. Este trabajo ha sido posible por una clara identificación de los principales efectos de propagación a estas tasas de bits. Estas dos tasas de bits ofrecen la posibilidad de actualizar los enlaces de 10 Gbps a 40 y luego a 100 Gbps dependiendo de la capacidad requerida.

Las tasas de bits de 40 y 100 Gbps ofrecen un costo atractivo por bit de información transportado sobre redes ópticas, lo cual es posible gracias a la eficiencia espectral del esquema de modulación DQPSK. Este esquema, además permite que la máxima tasa de bits en el dominio eléctrico sea de 25 Gbps, disminuyendo la complejidad y costos del sistema eléctrico, lo que a su vez disminuye los efectos ópticos.

En particular para aplicaciones en redes metropolitanas y regionales la eficiencia en costos y la posibilidad de reúso de las infraestructuras existentes es esencial, por esta razón Ethernet y OTN son consideradas las plataformas para las futuras redes de nueva generación.

Desde el punto de vista comercial y de mercado, se observa que los estándares en interfaces y formatos de transmisión están establecidos. Se espera un despliegue masivo de la tecnología y una migración desde las actuales tecnologías de transmisión basadas en 10 Gbps.

Referencias

- [1] R. Hui, M. O'Sullivan "Fundamental of Optical Devices" in *Fiber Optic Measurement Techniques*, 1 ed. Burlington, USA: Academic Press, 2008, ch. 1.
- [2] R. Ramaswami, K. Sivaraman and G. Sasaki, "Dispersion," in *Optical Networks A Practical Perspective*, 3th ed. Burlington, USA: Elsevier, 2010, ch. 5, sec. 5.7, pp.314–320.
- [3] A. Marikani, "Losses in Optical Fibres," in *Engineering Physics*, 1th ed. New Delhi, Asoke K. Ghosh, 2009, ch. 3.8, sec. 3.8.2, pp. 79–80.
- [4] R. Quimby, "Dispersion in Optical Fibers," in *Photonics and Lasers: An Introduction*, 1th ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2006, ch. 6, pp. 74–75.
- [5] J. López, A. Toledo, H. Ordóñez (2011, Oct. 3). *Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM* [Online]. Available: dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3914165.pdf
- [6] TELNET Redes Inteligentes S.A. (2009). *Fibra óptica para NGN – Dispersión cromática y PMD*. [Online]. Available: http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user_upload/preventa/presentaciones/whitepaper%20-Fibra%20optica%20para%20NGN-dispersion%20cromatica%20y%20PMD-Telnet-RI%20-%20ES.pdf
- [7] F. Ramos, "ESTUDIO DE EFECTOS NO LINEALES EN DISPOSITIVOS FOTÓNICOS Y SU APLICACIÓN EN SISTEMAS RADIO SOBRE FIBRA ÓPTICA," M.S. thesis, Dept. Telecommun. Universidad Politécnica de Valencia, 2000.
- [8] G. Agrawal, "Multichannel Systems" in *Fiber-Optic Communication Systems*, 3th ed. New York, USA: Wiley, 2002, ch. 8, sec. 8, pp. 366–368.
- [9] M. Azadeh "Optical Fibers" in *Fiber Optics Engineering*, 1 ed. California, USA: Springer, 2009, ch. 5, sec. 5.6, pp. 147–148.

- [10] C. DeCusatis, "Optical Link Budgets and Design Rules," in *Handbook of Fiber Optic Data Communication*, 3th ed. New York, USA: Poughkeepsie, 2007, ch. 12, sec. 12.3.9, pp. 291–295.
- [11] G. Agrawal, "Dispersion Management" in *Fiber-Optic Communication Systems*, 3th ed. New York, USA: Wiley, 2002, ch. 7, sec.7.7.3, pp. 302–305.
- [12] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 3rd ed., Academic Press, San Diego, CA, 2001.
- [13] R. Ramaswami, K. Sivarajan and G. Sasaki, "Nonlinear Effects," in *Optical Networks A Practical Perspective*, 3th ed. Burlington, USA: Elsevier, 2010, ch. 2, sec. 2.5.7, pp. 90–92.
- [14] A. Leiva, M. Tarifeño, R. Olivares. (2007, oct 17). *EFFECTOS DE LA DISPERSIÓN POR MODO DE POLARIZACIÓN (PMD) EN LA PROPAGACIÓN DE PULSOS A TRAVÉS DE FIBRAS ÓPTICAS* [Online]. Available: <http://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v15n3/art14.pdf>
- [15] G. Agrawal, "Dispersion Management" in *Fiber-Optic Communication Systems*, 3th ed. New York, USA: Wiley, 2002, ch. 7, sec.7.9.4, pp. 317–320.
- [16] F. Moliner. (2009, Nov). *Análisis del OSNR de configuraciones de enlaces de Fibra Óptica* [Online]. Available: <http://arantxa.ii.uam.es/~jms/pfsteleco/lecturas/20091201FabioMoliner.pdf>
- [17] Telnet Redes Inteligentes. (2009, Nov). *Fibra Óptica Para NGN – Dispersion cromática y PMD* [Online]. Available: http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user_upload/preventa/presentaciones/whitepaper%20-Fibra%20optica%20para%20NGN-dispersion%20cromatica%20y%20PMD-Telnet-RI%20-%20ES.pdf
- [18] J. K. Author. (2012, Nov 3). *Ratifican Estandar Ethernet 40/100G* [Online]. Available: blog.jmacoe.com/redes/ratifican-estandar-ethernet-40-100g/
- [19] G. Chanda. (2012). *The Market Need for 40 Gigabit Ethernet* [Online]. Available: http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/switches/ps5718/ps708/white_paper_c11-696667.pdf
- [20] Raybon, G.; Winzer, P.J.; , "100 Gb/s Challenges and Solutions," *Optical Fiber communication/National Fiber Optic Engineers Conference*, 2008. OFC/NFOEC 2008. Conference on , vol., no., pp.1-35, 24-28 Feb. 2008
- [21] Xixia. (2009, Sep). *An overview of Next-Generation 100 and 40 Gigabit Ethernet Technologies* [Online]. Available: http://www.ixiacom.com/pdfs/library/white_papers/100GbE_Overview_white_paper.pdf
- [22] Huawei. (2012, Nov 3). *E2E 100G Standard Developments* [Online]. Available: http://www.huawei.com/ilink/caen/solutions/broader-smarter/morematerial-b/HW_104782
- [23] OIF (2012, Nov 3). *The Optical Internetworking Forum: Driving Cooperative Innovation* [Online]. Available: http://www.oiforum.com/public/documents/OIF_Background_Final.pdf
- [24] D. Vasquez. (2009, nov). *ESTUDIO DE REDES DE TRANSPORTE ÓPTICO (OTN), COMO PLATAFORMA PARA REDES MULTISERVICIOS* [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4172/1/CD-2559.pdf>
- [25] *Characteristics of optical transport network hierarchy equipment functional blocks*, ITU-T G.798, 2010.
- [26] Altera. (2009, Jul). *Optical Transport Networks for 100G Implementation in FPGAs* [Online]. Available: <http://www.altera.com/literature/wp/wp-01115-otn-100g.pdf>
- [27] G. Ibáñez. "Contribución al diseño de redes de campus Ethernet autoconfigurables". Ph.D. Thesis. Departamento de Ingeniería Telemática. Universidad Carlos III de Madrid. Madrid, España. 2005.
- [28] G. Millan, G. Lefranc. (2009, Dec 11). *INCLUSIÓN DE CORRELACIONES TEMPORALES CON DEPENDENCIA A LARGO PLAZO Y PATRONES AUTOSIMILARES EN MODELOS DE REDES IEEE 802.3*. [Online]. Available: <http://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v18n1/art11.pdf>

- [29] ImaginART (2010, Nov). Ethernet: Pasado, Presente y futuro [Online]. Available: <http://www.imaginant.es/televigilancia/pdf/Ethernetpasadopresentefuturo.pdf>
- [30] G. Chanda, Y. Chang. (2010, Nov). *40 GbE: What, Why & Its Market Potential* [Online]. Available: http://www.cse.ohio-state.edu/~panda/788/papers/1h_40GbE_What_Why_Its_Market_Potential.pdf
- [31] CISCO CERTIFIED NETWORK ASSOCIATE (2011: Medellín). Network Fundamentals. Aspectos básicos de networking. Medellín. Capítulo 9.
- [32] JDSU. (2010, oct). *100 Gigabit Ethernet – Fundamentals, Trends, and Measurement Requirements* [Online]. Available: http://www.jdsu.com/ProductLiterature/100GE-fundamentals-white_paper.pdf
- [33] B. Dussen, G. Hankins (2011, Jan. 7). *Operational Considerations for Deploying 100 Gigabit Ethernet* [Online]. Available: <http://www.nanog.org/meetings/nanog51/presentations/Monday/NANOG51.Talk32.hankins-nanog51-100-gbe.pdf>
- [34] ADC Telecommunications, Inc (2010). *40 and 100 Gigabit Ethernet: An Imminent Reality* [Online]. Available: <http://www.adc.com/us/en/Library/Literature/108956AE.pdf>
- [35] C. Loberg. (2010, oct. 11). *New test requirements for 40/100 GbE transceivers* [Online]. Available: <http://www.eetimes.com/design/test-and-measurement/4210616/New-test-requirements-for-40-100-GbE-transceivers>
- [36] Ohm, M.; Freckmann, T.: “Comparison of different DQPSK transmitters with NRZ and RZ impulse shaping”, IEEE/LEOS Workshop on Advanced Modulation Formats, San Francisco, USA, CA, July 2004
- [37] P. Boffi, Member, IEEE, M. Ferrario, L. Marazzi, P. Martelli, P. Parolari, A. Righetti, R. Siano, and M. Martinelli, Member, IEEE, “Stable 100-Gb/s POLMUX-DQPSK Transmission With Automatic Polarization Stabilization”, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 21, NO. 11, JUNE 1, 2009
- [38] S. Kollar. (2010). *Core Network Evolution and IPoDWDM: 40G 100G and Beyond* [Online]. Available: http://www.cisco.com/web/SK/expo2011/pdfs/Core_Network_Evolution_Stefan_Kollar.pdf
- [39] Pierpaolo Boffi,* Maddalena Ferrario, Lucia Marazzi, Paolo Martelli, Paola Parolari, Aldo Righetti, Rocco Siano, and Mario Martinelli, “Measurement of PMD tolerance in 40-Gb/s polarization-multiplexed RZ-DQPSK”, 18 August 2008 / Vol. 16, No. 17 / OPTICS EXPRESS 13398
- [40] Boacade. (2010). *40 Gigabit and 100 Gigabit Ethernet Are Here!* [Online]. Available: http://www.brocade.com/downloads/documents/white_papers/40_100_GbE_Are_Here_WP.pdf
- [41] A. Weissberger. (2012, Aug 24). *Huge Pop in China Boosts Global Service Provider Router & Switch Market in 2Q 2012!* [Online]. Available: <http://community.comsoc.org/blogs/alanweissberger/infonetics-huge-pop-china-boosts-global-service-provider-router-switch-market->
- [42] M. Kerner (2012, Aug 24). *Enterprise and Service Provider Router and Switch Markets Post Gains* [Online]. Available: <http://www.enterprisenetworkingplanet.com/netsysm/enterprise-and-service-provider-router-and-switch-markets-post-gains.html>
- [43] M. Machowinski. (2012). *Cisco gains enterprise router share; North America posts strongest year-over-year* [Online]. Available: <http://www.infonetics.com/pr/2012/1Q12-Enterprise-Routers-Market-Highlights.asp>
- [44] IDC (2012). *Chart: Top Five Worldwide Layer 2/3 Ethernet Switch Vendors, Revenue Market Share, 2Q 2012* [Online]. Available: <http://www.twylah.com/IDC/tweets/238675005611843586>
- [45] J. Burt (2012, Feb 1). *Cisco Upgrades Catalyst, Nexus Switches for 40, 100 Gigabit Ethernet Support* [Online]. Available: <http://www.eweek.com/c/a/Enterprise-Networking/Cisco-Upgrades-Catalyst-Nexus-Switches-for-40GbE-100GbE-Support-240130/>

- [46] T. Irujo *OM4 - La Próxima Generación De Fibra Multimodo* [Online]. Available: <http://www.conelectronica.com/Cables-de/-para-Fibra-Optica/OM4-La-pr%C3%B3xima-generaci%C3%B3n-de-fibra-multimodo.html>
- [47] (2011, Feb 11). *What is OM4 Fiber?* [Online]. Available: <http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/what-is-om4-fiber/>
- [48] M. Traverso (2010, Jun 7). *CFP MSA Hardware Specification* [Online]. Available: <http://www.cfp-msa.org/Documents/CFP-MSA-HW-Spec-rev1-40.pdf>
- [49] Corning LANscape (2009, May). *Tecnología de Óptica Paralela* [Online]. Available: http://esmedia.corning.com/CableSystems/%5CResource_Documents%5Cwhitepapers_rl%5CLAN-982-SL.pdf
- [50] R&M (2011). *MPO/MTP - Introduction to Parallel Optics Technology* [Online]. Available: http://www.datacenter.rdm.com/files/downloads/ffcab2a37afec67295d29900fa31dc49/RdM_White_Paper_MPO_MTP%20-%20Introduction%20to%20Parallel%20Optics%20Technology_e.pdf
- [51] USCONEC *Operational Considerations for Deploying 100 Gigabit Ethernet* [Online]. Available: <http://www.usconec.com/resources/faq.htm#ques1>

