

# Retos en la transmisión de 40/100Gb/s sobre fibra óptica

**Diego Fernando Alzate C.**

*Aspirante a especialista en Telecomunicaciones*

**Ana Cárdenas,**

*PhD, Directora*

*Universidad Pontificia Bolivariana*

*Tel.: (+54) 3118282, Fax (+54) 3116292,*

*Email: diegoff@gmail.com*

## **Abstract**

En este *survey* se discutirán formatos de modulación avanzados para la transmisión de 40/100Gb/s sobre fibra óptica en sistemas de corta y larga distancia, así como algunos de los problemas en estas redes ópticas como son: ruido producido por amplificadores ópticos, dispersión cromática, PMD y efectos de no linealidades de la fibra.

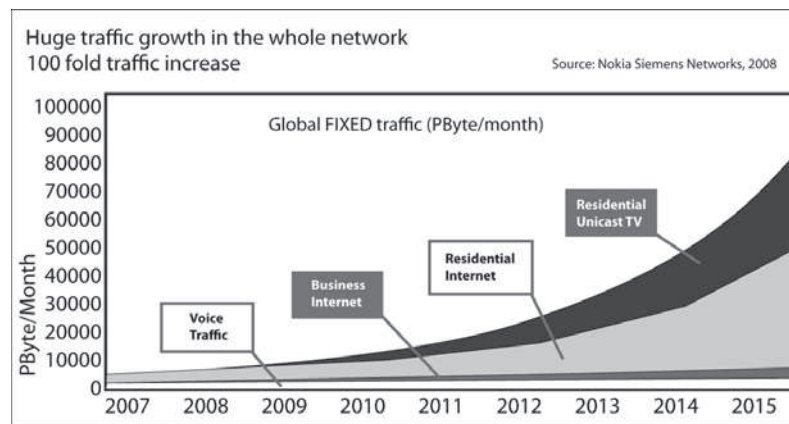
**Index Terms**— Modulación en fase diferencial, modulaciones digitales, modulaciones en intensidad, redes ópticas, WDM.

## 1. Introducción

Las redes de telecomunicaciones modernas necesitan ser construidas con la proyección de un enorme crecimiento de tráfico. Hoy algunos nodos de Internet Exchanges (IXs) tienen unas tasas de crecimiento de más del 200% (Figura 1) [1] debido a los aumentos dramáticos en el número de usuarios, junto con las necesidades crecientes de datos y servicios de video de banda ancha (ejemplo: VoIP, IPTV, VoD audio *streaming*, etc.).

Sobrellevar esta explosión en tráfico mundial solo puede ser asegurado con la implementación de las más avanzadas tecnologías de redes de transporte ópticas 40/100GbE (Giga bit Ethernet) que predominarán en el futuro.

Figura 1. Tendencias de crecimiento de tráfico mundial.



Source: 40G today, 100G tomorrow high-speed transmission in DWDM networks, Nokia-Siemens, 2009, p 4.

En julio de 2006, IEEE 802.3 creó el grupo de estudio de alta velocidad (HSSG High Speed Study Group) para examinar las necesidades de conectividad de banda ancha de próxima generación. En julio de 2007, el grupo aprobó la solicitud de contar con dos tasas de controles de acceso al medio (MAC): 40GbE para aplicaciones servidor-servidor y servidor-*switch*; y 100GbE para aplicaciones *switch-switch* incluyendo enlaces punto a punto entre campus. Los requerimientos de las interfaces física aprobados se muestran en la tabla 1 [2].

**Tabla 1.** Requerimientos de la capa física aprobados, Backplane: placa de circuito impreso, MMF (Multi Mode Fiber) Fibra óptica multimodo, SMF (Single Mode Fiber) Fibra óptica monomodo.

Distancia y medio	40GbE	100Gbe
1m -Backplane	X	
10m -Cobre	X	x
100m -MMF Ribbon	X	x
10km -SMF		x
40km -SMF		x

Durante el año 2010 se tiene como objetivo completar los estándares IEEE 802.3 para 40/100GbE, mientras tanto ITU Study Group 15 (SG15) está investigando los requerimientos de las tasas de transporte de próxima generación más allá de los 40Gbps.

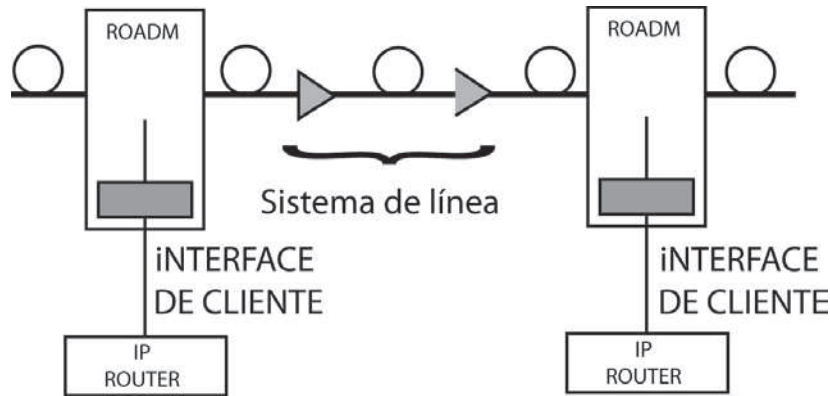
Estas tendencias de grandes anchos de banda han generado numerosas alternativas para aplicaciones de 40/100Gb/s. Tales alternativas se orientan básicamente en la definición de la interfaz de cliente y la interfaz de transporte.

La interfaz de cliente está definida para aplicaciones de corta distancia TDM, entendiéndose por su nombre la conexión entre el transportador y el cliente, y la interfaz de transporte está definida para aplicaciones de larga distancia WDM, entre transportadores.

## Interfases de corto alcance o de cliente

En un sistema de alta capacidad de transmisión, el cliente puede tener IP Routers, Switches u otros elementos electrónicos de red con información que necesite ser transportada a través de una red óptica (véase figura 2).

**Figura 2. ROADMs (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers) en un sistema óptico de transporte.**



Source: *System Technologies for 100g Transport Networks*, Peter Magill, AT&T Lab.

Actualmente, la industria está trabajando fuertemente en seleccionar la interfaz de cliente 100G más costo-efectiva, y aunque la mayor cantidad de estas interfaces serán usadas en redes de empresas (LANs, Granjas de servidores, Data Centers, etc.), los *carriers* necesitan una interfaz que sea estable en el tiempo y que sea la más costo-efectiva en el largo plazo [3].

El estándar para interfaces de corto alcance es llamado actualmente x4; consiste en 4 fibras ópticas paralelas de 25Gbps (o 4x25Gbps), cada una con una longitud de onda diferente sobre SMF (Single Mode Fiber). Otra alternativa es una interfaz con una sola longitud de onda que debe transportar del orden de 115Gbps.

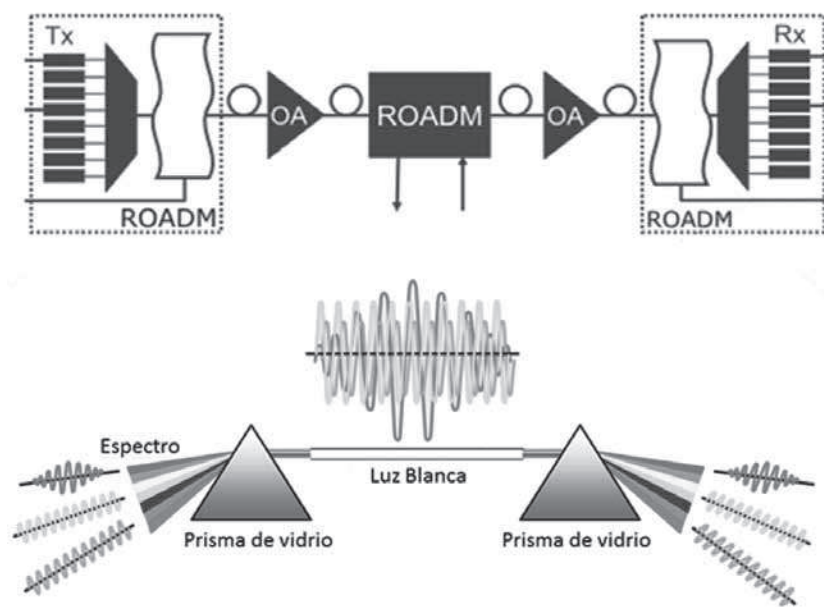
Debemos considerar que la interfaz paralela 4X25Gbps es más económica que la interfaz con una longitud de onda con la tecnología de hoy, en los próximos años con el desarrollo de la electrónica y de los componentes electrónicos, la interfaz de varias longitudes de onda puede llegar a ser más económica. Otra interfaz actualmente en desarrollo por IEEE 802.3 ba es conocida como CAUI (C = 100 en romano Attachment Unit Interface) para 100Gbps o XXAUI (10\*10 Attachment Unit Interface) consistente en llevar 10 enlaces de fibra a 10Gbps para obtener así 100Gbps [4].

## Interfaces para transmisión de largo alcance o de transporte

Una de las opciones más utilizadas para transmisión de largo alcance son los sistemas WDM (Wavelength Division Multiplexing), cuya estructura básica se muestra en la Figura 3.

Las señales ópticas generadas por  $N$  Tx (Transmisores) con una longitud de onda  $\lambda_i$  son multiplexadas en una sola fibra óptica usando un multiplexor WDM (mux). Actuando como un filtro pasa banda óptico para cada canal, un mux limita el ancho espectral de un formato de modulación para evitar la diafonía WDM con los canales vecinos. Después de transmitir sobre una serie de tramos de fibra óptica y OAs (Optical Amplifiers) espaciadas periódicamente, los canales WDM se separan usando un de-multiplexor WDM (demux) y luego se detecta cada canal Rx (Receptor). El demux otra vez actúa como un filtro pasa bandas óptico para cada canal y así suprimir ambas interferencias, la de canales WDM vecinos y los ruidos de los OAs. Cada portadora óptica forma un canal óptico que podrá ser tratado independientemente del resto de canales que comparten el medio (fibra óptica) y contener diferente tipo de tráfico. De esta manera se puede multiplicar el ancho de banda efectivo de la fibra óptica, así como facilitar comunicaciones bidireccionales.

Figura 3. Configuración genérica de un sistema de transmisión óptico WDM.



Source: *Delivering 100G per wavelength with today's DWDM infrastructure*, Michael Finkenzeller, IPT DWDM

Dentro de la familia WDM existen 4 sistemas, DWDM (Dense Wavelength-Division Multiplexing) de ultra larga distancia, DWDM de larga distancia, DWDM metropolitana y CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing). Las 3 primeras utilizan componentes ópticos más complejos, de mayores distancias de

transmisión y más caros que CWDM, la cual está desarrollada especialmente para zonas metropolitanas, ofreciendo anchos de banda relativamente altos a un costo mucho más bajo; esto debido a los componentes ópticos de menor complejidad, limitada capacidad y distancia, por lo cual es la más competitiva a corta distancia. A diferencia del CWDM, en DWDM se consigue mayor número de canales ópticos reduciendo la dispersión cromática de cada canal mediante el uso de un láser de mayor calidad, fibras de baja dispersión o mediante el uso de módulos DCM (Dispersion Compensation Modules); de esta manera es posible combinar más canales reduciendo el espacio entre ellos. Actualmente se pueden conseguir 40, 80 ó 160 canales ópticos separados entre sí 100 GHz, 50 GHz ó 25 GHz, respectivamente [5].

Sin embargo, aunque las distancias de transmisión y las tasas de bits por canal se incrementan y el espacio entre canales se reduce, aparecen nuevos formatos de modulaciones avanzadas para mitigar las distorsiones debidas a las no linealidades de la fibra en el transporte de la señal, mejorando la sensibilidad del receptor o para facilitar el incremento de las tasas de bits sobre los límites de los sistemas binarios.

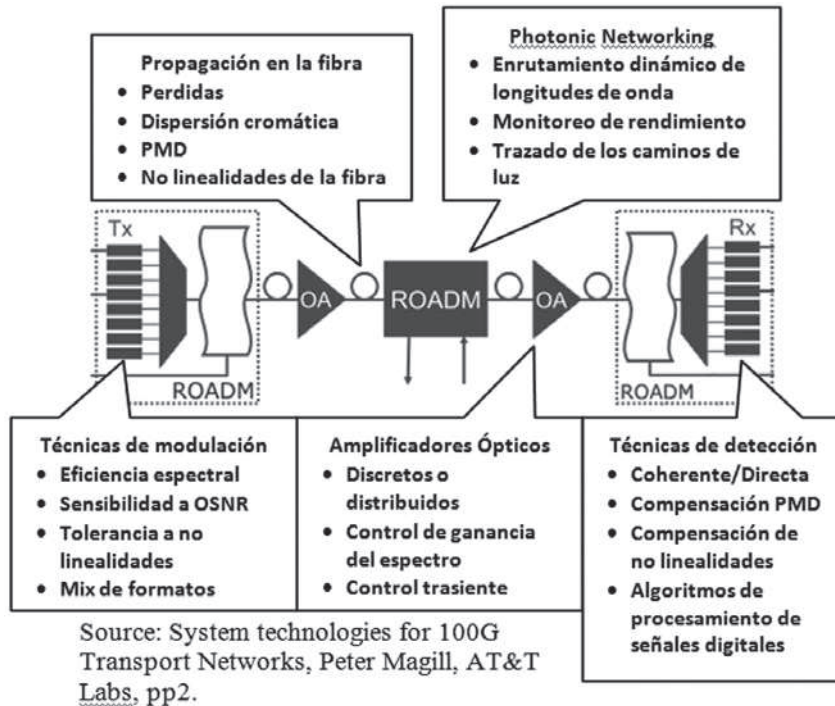
El presente artículo tiene como propósito mostrar una revisión de los formatos de modulación avanzados actualmente propuestos, para la transmisión de 40/100Gb/s sobre fibra óptica en sistemas de corta y larga distancia así como algunos de los problemas que se presentan para esta transmisión en redes ópticas. El artículo está organizado de la siguiente forma: en la sección 2, se tratan algunos de los principales impedimentos de la transmisión de 40/100Gb/s y como ellos impactan los diferentes formatos de modulación en los sistemas de alta capacidad soportados sobre redes ópticas, en la sección 3 se revisan las principales técnicas de modulación, en la sección 4 se compara la detección coherente e incoherente, finalmente se presentan las conclusiones más relevantes producto del desarrollo de esta revisión en las secciones 5 y 6.

## 2. Problemas en los sistemas de transporte óptico en 40/100G

Hay muchas opciones de tecnología que empiezan a ser exploradas para transmisiones de largo alcance (>600km) y ultra largo alcance (>1000km) para 100Gb/s. Estas tecnologías tienen en cuenta diferentes aspectos de la transmisión como: tasa de baudios, polarización individual o multiplexación de la polarización (pol-mux), bits por símbolo y formatos de modulación, recepción coherente o incoherente, separación entre canales de la red, técnicas de compensación y de dispersión, Procesadores de Señales Digitales (DSP), número de bandas de longitud de onda (Ejemplo: C,L o C+L), amplificadores ópticos (OA), entre otros[6]. Una parte importante de

estos aspectos obedece a la consideración de los problemas que se presentan en la transmisión de alta capacidad, en redes ópticas, como los que se muestran en la figura 4. A continuación se tratarán algunos de los más relevantes.

Figura 4. Revisión de los problemas más importantes en redes ópticas de transporte.



Source: System technologies for 100G Transport Networks, Peter Magill, AT&T Labs, p 2.

## 2.1 Propagación en la fibra

### 2.1.1 Pérdida

La fibra óptica es un medio excepcional, con coeficientes de atenuación por debajo de los 0.2 dB/km y con un ancho de banda del orden de los THz. No obstante, después de grandes distancias de transmisión o después de pasar la señal a través de elementos de la red, la potencia óptica cae por debajo del umbral de detección de los Rx ópticos lo que hace que el sistema necesite OAs.

Desde el punto de vista de las comunicaciones digitales, el impacto principal de los OAs es la generación de ASE (Amplified Spontaneous Emission) o emisión espontánea amplificada [7], que por sí mismo representan una fuente de ruido Gaussiano. Si múltiples OAs son conectados para compensar las pérdidas de potencia en la fibra, la ASE aumentará en el sistema, lo que se reflejará en una disminución de la OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio) [7].

La forma más común de mejorar la OSNR es por medio de las modulaciones, dependiendo si son en intensidad o en fase, como se tratará en la Sección 2.2.2.

### 2.1.2 CD (Chromatic Dispersion)

CD produce una variación en la velocidad de propagación para los diferentes componentes espectrales contenidos en una señal óptica modulada, que en el dominio del tiempo resulta en una distorsión de la señal y típicamente en la ampliación del pulso.

La descripción matemática de la CD es definida por medio de la expansión de Taylor de número de onda<sup>1</sup>  $k$ , y es función de la frecuencia angular  $\omega$  (cerca de alguna frecuencia central  $\omega_0$ ) [39].

<sup>1</sup>El número de onda se relaciona con el cambio de fase por unidad de longitud de una onda plana en un medio homogéneo.

$$k(\omega) = k_0 + \frac{\partial k}{\partial \omega}(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2}(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 k}{\partial \omega^3}(\omega - \omega_0)^3 + \dots \quad (1)$$

Donde los términos correspondientes a cada uno de los diferentes órdenes tienen los siguientes significados:

Término de orden cero, contiene los cambios de fase común.

Término de primer orden, contiene el inverso de la velocidad del grupo ( $v_g$ ) y describe un retraso de tiempo general sin un efecto sobre la forma del pulso [39].

$$k' \equiv \frac{\partial k}{\partial \omega} = \frac{1}{v_g} \quad (2)$$

Término de segundo orden, contiene el GDD (Group Delay Dispersion) o retardo de la dispersión de grupo por unidad de longitud [39].



$$k'' \equiv \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} \quad (3)$$

La dispersión de segundo orden es la derivada del inverso de la velocidad de grupo con respecto a la frecuencia angular [39].

$$k' \equiv \frac{\partial k}{\partial \omega} = \frac{1}{v_g} \Rightarrow k'' \equiv \frac{\partial}{\partial \omega} \left( \frac{1}{v_g} \right) \quad (4)$$

Se puede distinguir entre dispersión normal ( $k'' > 0$ ) y dispersión anormal para ( $k'' < 0$ ). En la dispersión normal la velocidad de grupo se reduce mientras que aumenta la frecuencia óptica y se produce para los medios de comunicación más transparente en la región espectral visible. La dispersión anormal ocurre algunas veces con longitudes de onda largas (Ejemplo: sílice para longitudes de onda mayores a 1.3  $\mu\text{m}$ ).

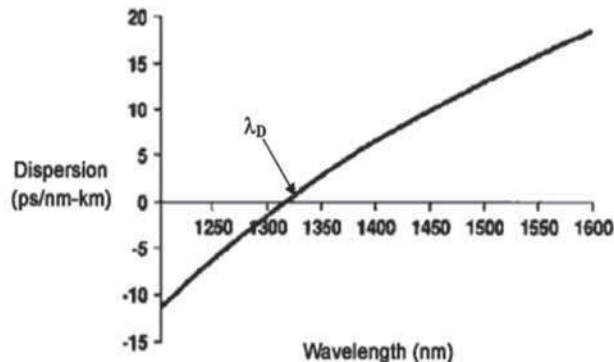
Otro parámetro concerniente a la dispersión de la fibra es el parámetro de dispersión  $D_\lambda$ , y es comúnmente usado en comunicaciones de fibra óptica [8]:

$$D_\lambda = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \cdot \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} \quad (5)$$

En unidades de ps/(nm·km)

En la figura 5 se muestra la variación del parámetro  $D_\lambda$  para una fibra óptica mono modo, entre las regiones con dispersión normal y anormal existe la longitud de onda de cero dispersión; esta longitud de onda es de 1.3  $\mu\text{m}$  para fibras de telecomunicaciones estándar y reduce en gran forma la ampliación de los pulsos [9].

Figura 5. Variación de la CD para una SMF

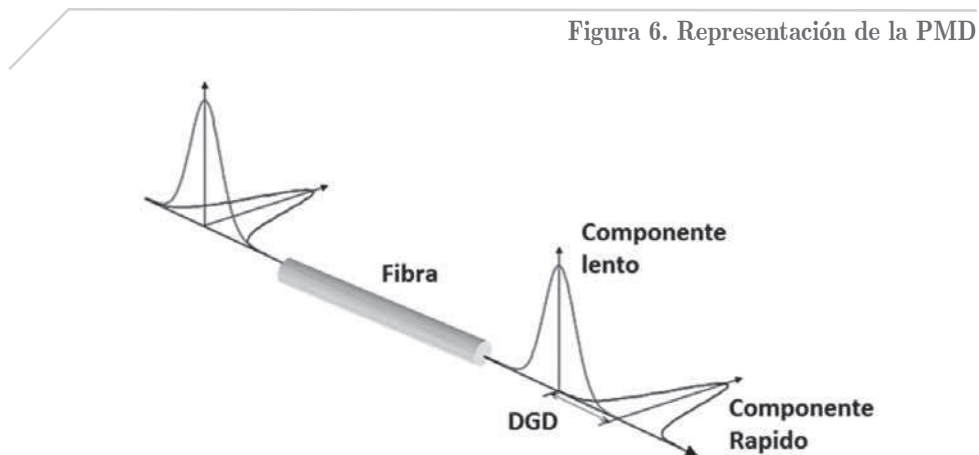


Source: *Advanced Modulation Formats For High-Bit-Rate Optical Networks*, Muhammad Haris, School of Electrical and computer Engineering, pp 10, 2008.

Para operación a 40/100G hay algunos problemas con la modulación NRZ (*non-return to zero*). Las señales 10G NRZ pueden tolerar CD hasta 1000ps/nm, pero señales 40G NRZ solo pueden tolerar cerca de 60 ps/nm y esto es muy bajo para cualquier uso práctico de 40G. Con 100G la CD se deberá reducir en un factor de 4-5 más que en 40G. Algunas propuestas para solucionar este problema en 40/100G son módulos de compensación de CD sintonizable que pueden ajustar la CD en el sitio del Rx [10]. Otra alternativa son los nuevos formatos de modulación que ayudan a reducir la influencia de la dispersión y mejorar la transmisión de 40/100G [11], entre los cuales están Dúo Binaria, DPSK, DP-QPSK, y serán tratados en la sección 3.

### 2.1.3 PMD (*Polarization Mode Dispersion*)

PMD es un problema significativo encontrado en un gran número de redes ópticas, y con especial incidencia en las redes de alta capacidad. Ocurre cuando dos polarizaciones diferentes de una señal de luz transmitida se propagan con una diferencia de velocidad significativa a través de la fibra [12] (véase Figura 6).



Source: *Polarisation Mode Dispersion in 100GbE links*, Pete Anslow, Nortel Networks, IEEE P802.3ba, Orlando, pp 3, 2008.

Este efecto puede ser causado por problemas relacionados con la fabricación como imperfecciones en la fibra o asimetrías geométricas, por estrés mecánico, cambios de temperatura, movimientos de la fibra o también por los materiales mismos como el efecto de birrefringencia<sup>2</sup>. Además, la mayoría de los componentes ópticos del sistema contribuyen un poco a la PMD de la red de transporte [13].

En fibras reales, las imperfecciones son aleatorias y cambian la simetría circular causando que las dos polarizaciones se propaguen a diferentes velocidades. En este caso, las dos componentes de polarización de la señal se separan lentamente causando

que los pulsos se agranden y se sobrepongan, debido a esto el efecto de agrandar el pulso corresponde a un camino aleatorio y se conoce como DGD (Differential Group Delay) o retardo diferencia de grupo y es proporcional a la raíz cuadrada de la distancia de propagación  $L$ .

$$\Delta\tau = D_{\text{PMD}}\sqrt{L} \quad (6)$$

Donde  $D_{\text{PMD}}$  es el parámetro PMD de la fibra, típicamente medido en  $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ , y es una medida de la fuerza y frecuencia de las imperfecciones (véase Tabla 2).

**Tabla 2.** Restricciones de transmisión *vs.* tasa de línea

	10G	40G	100G
<b>Bit interval reduction</b>	100ps	25ps	10ps
<b>Electrical BW increase</b>	1	4	10
<b>Optical Spectrum occupancy</b>	1	~4	~10
<b>Chromatic dispersion tolerance (ps/nm)</b>	1	1/16	1/100
<b>PMD tolerance (ps)</b>	1	1/4	1/10
<b>Noise margin</b>	0dB	-6dB	-10dB

*Source: Retaining Network Agility in the Evolution to 40Gbps and 100Gbps, Michael Belanger, PhD, Technical Advisor, Next Generation Networks.*

Una red que transmite a 10 Gbps tiene 16 veces más tolerancia a la dispersión cromática que una que trabaja a 40 Gbps. Este dato permite hacernos una idea de la limitación que supone la CD en sistemas de alta velocidad. Las redes ópticas tienen una CD máxima acumulada hasta la cual el sistema funciona correctamente. Esto es análogo para PMD.

<sup>2</sup>La birrefringencia o doble refracción es una propiedad de ciertos cuerpos de desdoblarse un rayo de luz incidente en dos rayos linealmente polarizados de manera perpendicular entre sí como si el material tuviera dos índices de refracción distintos.

El cambio de simetría aleatorio tiene diferentes categorías: asimetrías geométricas, estrés en el material de la fibra, el índice de refracción depende de la polarización.

Todos estos efectos dependen de imperfecciones en fabricación o estrés mecánico y térmico de la fibra impuesto en campo, sin embargo generalmente varían con el tiempo.

PMD es un factor limitante significativo para 100Gbps, y puede limitar la distancia a la cual la luz puede ser transmitida por una fibra.

Las siguientes directrices se aplican para la implementación de redes ópticas:

2.1.3.1 Para instalaciones nuevas de fibra el problema por PMD es usualmente insignificante ( $< 0.1 \text{ ps/km}^{1/2}$ ). Los fabricantes de fibra óptica son conscientes de los problemas causados por las asimetrías y han modificado los procesos de manufactura para resolverlos.

2.1.3.2 Para fibras fabricadas desde 1995, PMD está usualmente dentro de los límites ( $< 0.2 \text{ ps/km}^{1/2}$ ) para transmisiones de 40G.

2.1.3.3 Alta PMD (probablemente  $> 0.5 \text{ ps/km}^{1/2}$ ) debe ser asumida para fibras ópticas manufacturadas antes de 1995. Estas fibras fueron producidas con imperfecciones significativas, adicionalmente los empalmes de fibra tenían un estándar bajo de calidad aumentando significativamente este fenómeno. Por estas razones esta fibra es considerada de una calidad desconocida para PMD y se deben tomar medidas para garantizar la transmisión de 40/100G.

2.1.3.4 Las fibras ópticas aéreas son particularmente vulnerables y son también muy cuestionables para transportar 40/100G.

Para despliegues de 100Gbps, PMD es un problema que debe ser considerado, pero para el cual existen alternativas de disminución de sus efectos sobre la transmisión.

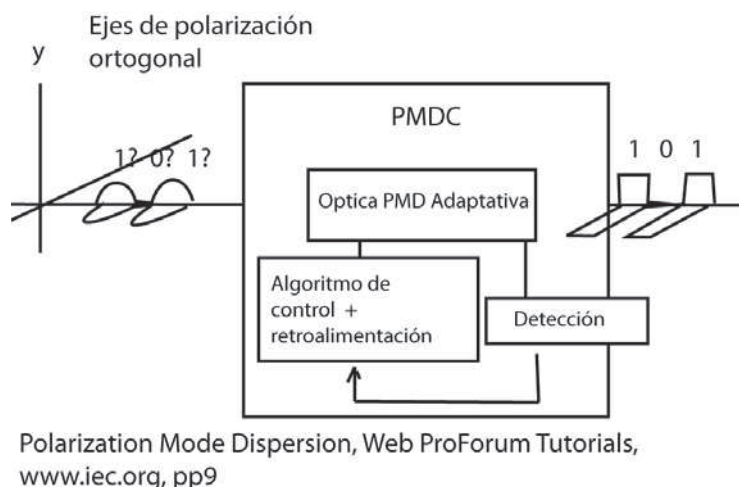
Los sistemas con fibras ópticas modernas no deben sufrir mayores problemas o extra costos significativos.

Para las fibras ya instaladas que presenten este problema, existen varias tecnologías que pueden ser usadas para efectos de compensación de PMD:

- Una opción consiste en equipos mecánicos que presionan una porción de la fibra para realinear los pulsos de polarización de un *bit* óptico. En otras palabras, un compensador mecánico de PMD (Mechanical PMDC). La primera desventaja de esta solución es que a largo plazo tiene una alta probabilidad de falla y además necesita mantenimiento constante.
- Otra opción son los PMD activos, la compensación puede llevarse a cabo utilizando técnicas eléctricas que aplican filtros a la señal de información recibida y puede eliminar algunas de las distorsiones inducidas por el PMD. Sin embargo, existen limitaciones en el rendimiento máximo alcanzable debido a la conversión óptica/eléctrica. Una desventaja es la dificultad de corregir un error óptico en la capa electrónica.

La tecnología PMDC más fiable y eficiente es el uso de óptica adaptativa para corregir y realinear los pulsos de los *bits* ópticos dispersos, como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Representación gráfica de un PMDC



*Polarization Mode Dispersion, Web ProForum Tutorials, www.iec.org, p 9.*

La figura 7 muestra como un *bit* óptico disperso de la red de fibra es corregido por el PMDC. Antes de la corrección, los pulsos polarizados de los *bits* son separados y dispersos por el PMD. El PMDC realinea y forma de nuevo el *bit* óptico antes de que sea decodificado por el receptor (Rx). La óptica adaptativa del PMDC es controlada por un algoritmo inteligente que es manejado por el análisis del *bit* óptico.

El impacto de PMD también depende de la velocidad de la línea de la señal transmitida [14], ya que la cantidad de errores de *bit* es directamente influenciado por la cantidad de PMD presente en la fibra óptica, por lo tanto es importante reducir la tasa de símbolos usando técnicas de modulación avanzadas.

### 2.1.4 No Linealidad de la fibra

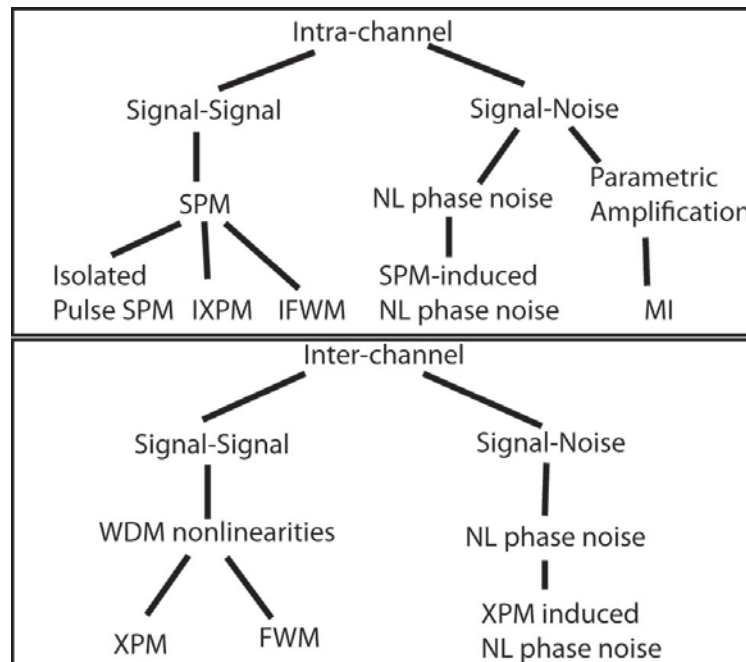
Debido al alto confinamiento de la luz en el núcleo de la fibra, se pueden alcanzar intensidades ópticas muy altas dentro de esta. Las altas intensidades pueden generar cambios en el índice de refracción de la fibra (No Linealidad de Kerr), lo que induce distorsión en las señales cuando son transmitidas a muy larga distancia [15].

Básicamente, los procesos no lineales que ocurren en los dispositivos fotónicos se clasifican atendiendo a su naturaleza y características. En particular, los principales efectos no lineales que han sido estudiados hasta el momento son:

- Automodulación de fase (*self-phase modulation*, SPM).
- Modulación de fase cruzada (*cross-phase modulation*, XPM).
- Mezclado de cuatro ondas (*four-wave mixing*, FWM).
- Dispersión estimulada de Brillouin (*Stimulated Brillouin scattering*, SBS).
- Dispersión estimulada de Raman (*Stimulated Raman Scattering*, SRS).
- Modulación de ganancia cruzada (*cross-gain modulation*, XGM).

Varios regímenes distintos de transmisión existen incorporados en sistemas de compensación de dispersión. Todos esos regímenes son dirigidos a minimizar el impacto de las no linealidades de la fibra y asociado con cada régimen existen unos tipos dominantes de no linealidad de la fibra que determinan la idoneidad de los formatos de modulación para mejorar este parámetro.

Figura 8. Clasificación de las no linealidades en la fibra óptica.



*Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks*, Peter J. Winzer, *Senior Member, IEEE, Member, OSA*, and Renè-Jean Essiambre, *Senior Member, IEEE, Fellow, OSA*, p 11.

La figura 8 muestra un resumen de la interacción de varias no linealidades de la fibra.

Cuando las no linealidades de la fibra ocurren entre pulsos del mismo canal WDM se denominan no linealidades intra-canal (*intra-channel*). Cuando la no linealidad requiere de dos o más canales se denominan no linealidades inter-canal (*inter-channel*).

La importancia de cada clase de no linealidad depende significativamente de la tasa de *bits* por canal, la potencia [40] y también depende en gran medida de la dispersión local de la fibra: en general, fibras con baja dispersión tienen fuertes efectos intercanal que las fibras con alta dispersión local. Detalles de las no linealidades se pueden consultar en [15, 18, 31]. El impacto de la no linealidad de la fibra en diferentes formatos de modulación depende fuertemente de las características físicas de la red óptica subyacente.

### 3. Técnicas de modulación

Dado que hay tasas de transmisión productoras de fenómenos que distorsionan las señales, y a que es muy probable el uso de amplificadores para la correcta recepción de la señal óptica, se han estado estudiando diferentes formatos de modulación que hagan más eficiente el uso del espectro óptico y en algunos casos se mitigan los efectos que degradan la señal transmitida.

#### 3.1 Eficiencia espectral

Como se mostró anteriormente, uno de los requerimientos de los operadores de redes comerciales es incrementar las tasas de los canales ópticos a 100 Gb/s, logrando así mejorar la capacidad de sus sistemas de transmisión por un factor de 10 cuando pasen de canales de 10G a canales de 100G. Este requerimiento implica que el espacio entre los canales ópticos, hoy en día típicamente de 50GHz, sea mantenido, esto para utilizar los sistemas actuales instalados, sin requerimientos adicionales de fibra, nuevo equipo u OAs.

Los canales 100G intrínsecamente requerirían 10 veces más OSNR que los canales 10G. La obligación de mantener la separación entre canales ópticos en 50GHz impulsará la elección de un formato de modulación más eficiente espectralmente que el OOK (On-Off Keying) usado actualmente en 10G; además, el requerimiento de aumentar la tolerancia al ruido motivará la elección de un formato de modulación más resistente al ruido así como el diseño de Rx más resistentes al ruido.

#### 3.2 OSNR (*Optical Signal Noise Ratio*)

Cuando se transmite 40G de la misma forma que 10G, utilizando modulación OOK, el ancho espectral de la señal sería cuatro veces mayor que con 10G. Por lo tanto

esto significaría que la señal recogería 4 veces más ruido de los OAs. Otra forma de verlo es que a 40G solo hay un cuarto de energía por *bit* disponible que en 10G, suponiendo que la potencia global de ambas señales es constante. Esto significa que a 40G la señal necesita 4 veces (6dB) más para sostener la misma OSNR. Con 100G los requerimientos de potencia adicional para sostener el mismo OSNR son 4 a 5 veces más que en 40G [16].

Existen varios métodos para mejorar el OSNR: EFEC (*Enhanced Forward Error Correction*) es una técnica que agrega redundancia eléctrica (transparentemente) a la información antes de ser transmitida ópticamente, y por lo tanto mejora la BER (*Bit Error Rate*) final después del proceso de detección, reduciendo así su sensibilidad al ruido óptico [17]. Otra técnica es el uso de bucles de control avanzado del amplificador y métodos de amplificación optimizados [17]. Esto se hace en combinación con el ajuste cuidadoso de cada canal óptico con el fin de optimizar el consumo de potencia de la fibra y evitar interferencias entre canales y efectos no lineales indeseados (*Enhanced Preénfasis*) [17].

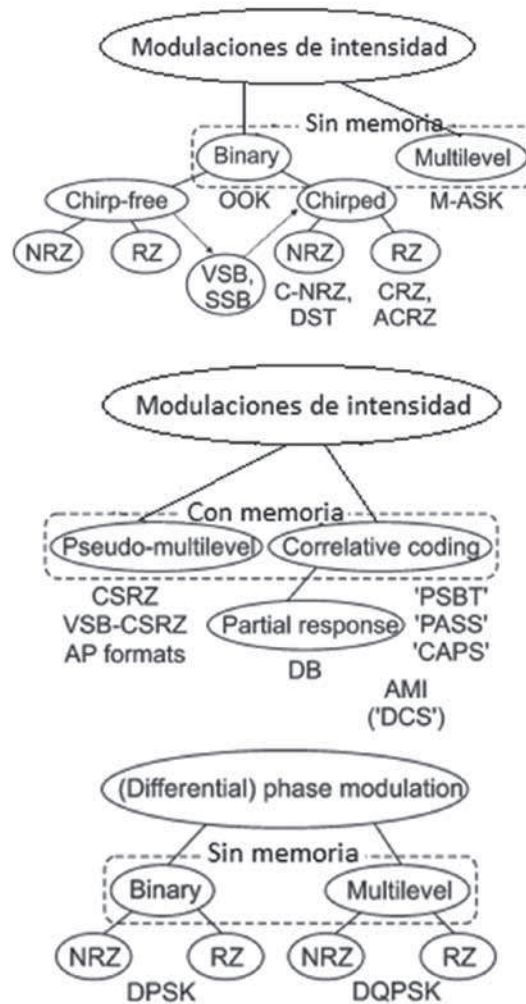
### 3.3 Formatos de modulación

En fibras ópticas, el campo óptico tiene tres atributos físicos que pueden ser usados para transmitir información: 1) Intensidad; 2) Fase (Frecuencia) y 3) Polarización. Dependiendo de cuál de estos se use para la transmisión de información podemos distinguir varios formatos de modulación. La Figura 9 muestra cómo los formatos de modulación más importantes actualmente caen en esta clasificación.



**Figura 9. Clasificación de algunas modulaciones.** (N)RZ: (*non*)return to zero; VSB: *vestigial sideband*; SSB: *single sideband*; OOK: *on/off keying*; C-NRZ: *chirped NRZ*; DST: *dispersion-supported transmission*; (A)CRZ: (*alternate*) *chirped RZ*; CSRZ: *carrier-suppressed RZ*; AP: *alternate phase*; DB: *duobinary*; PSBT: *phase-shaped binary transmission*; PASS: *phased amplitude-shift signaling*; CAPS: *combined amplitude phase-shift coding*; AMI: *alternate-mark inversion*; DCS: *DB carrier suppressed*; M-ASK: *multilevel amplitude-shift keying*; DPSK: *differential phase-shift keying*; DQPSK: *differential quadrature phase-shift keying*.

Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks, Peter J. Winzer, Senior Member, IEEE, Member, OSA, and Renè-Jean Essiambre, Senior Member, IEEE, Fellow, OSA, p 3.



La figura 9 muestra cómo algunos formatos de modulación son clasificados, nótese que es el atributo físico utilizado para transmitir datos de información lo que lleva a la clasificación.

### 3.3.1 Tecnologías de modulación

Las velocidades de las comunicaciones ópticas han sido limitadas tradicionalmente por la velocidad disponible de los componentes opto electrónicos; es de suma importancia considerar siempre los aspectos prácticos de la modulación y de detección de *hardware* en el diseño de formatos de modulación óptica. Encontrar la técnica de modulación más costo-efectiva para una aplicación en especial involucra aspectos del formato de modulación y la tecnología del modulador.

Tres tecnologías básicas de modulación ampliamente usadas hoy son: láser modulados directamente, moduladores por electro absorción y moduladores Mach-Zehnder (MZMs). De estas tecnologías, los MZMs son casi exclusivamente usados en sistemas de transporte de 40/100G debido a su buen rendimiento para controlar las modulaciones y la posibilidad de modular independientemente la intensidad y la fase del campo óptico [18].

### 3.3.2 Formatos de modulación óptica de intensidad

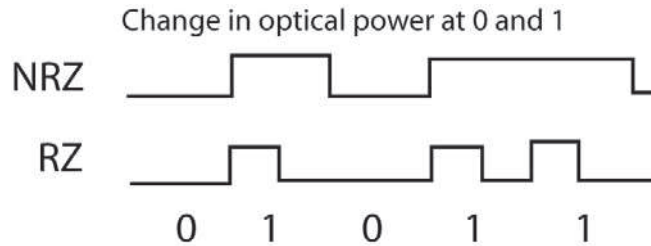
La modulación óptica de intensidad es llamada también modulación óptica continua; es similar a la modulación análoga AM, con la diferencia en la naturaleza de la señal que en este caso sería óptica en vez de eléctrica.

Cuando se habla de una modulación en intensidad que asigna un símbolo independientemente de los símbolos enviados antes o después de este, entonces nos referimos a una modulación sin memoria (*memory-less*).

#### 3.3.2.1 NRZ-OOK y RZ-OOK

Generalmente, la transmisión óptica utiliza fuertes modulaciones con NRZ y RZ. En la codificación NRZ más básica, la señal óptica es conmutada ON/OFF (luz emitida/luz apagada) para transmitir usando un simple código binario 1/0. El código RZ utiliza el mismo método ON/OFF para transmitir información pero en este método el pulso se pone en ON la mitad del ancho del pulso que en NRZ como resultado, la potencia óptica por *bit* se reduce aproximadamente a la mitad y el impacto de la no linealidad así mismo se reduce. (Véase figura 10).

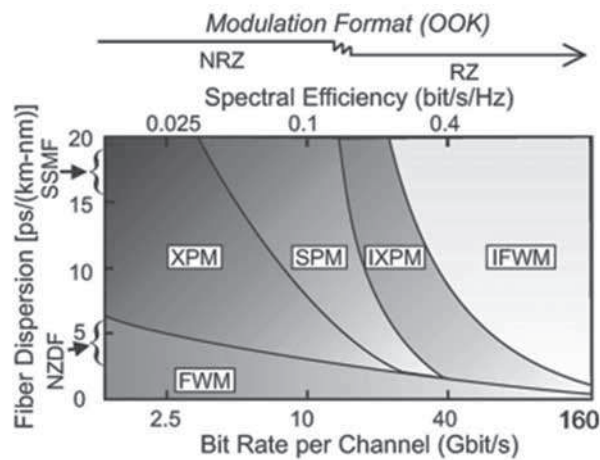
Figura 10. Codificaciones NRZ y RZ



Source: *Trends and Issues in Ultra-High Speed Transmission Technologies*, Anritsu, pp 3, 2209.

El impacto de la no linealidad de la fibra en varios formatos de modulación depende fuertemente de las características físicas de la red óptica subyacente. La figura 11 presenta el resultado de un extenso estudio numérico, mostrando la no linealidad dominante para una eficiencia espectral y dispersión de la fibra dada para una modulación OOK con códigos RZ, NRZ y con varias tasas de transmisión por canal óptico [18].

Figura 11. Importancia de los problemas de no linealidad intercanal e intracanal en sistemas WDM de diferentes tasas de bits por canal. SSMF: standard single-mode fiber; NZDF: non-zero dispersion fiber; XPM: (intra-channel) cross-phase modulation; FWM: (intra-channel four-wave mixing); SPM: self-phase modulation; IXPM: intra-channel XPM; IFWM: intra-channel FWM



*Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks*, Peter J. Winzer, Senior Member, IEEE, Member, OSA, and Renè-Jean Essiambre, Senior Member, IEEE, Fellow, OSA, p 12.

Para una eficiencia espectral dada (eje  $x$  arriba), la figura muestra la tasa de bits óptima (eje  $x$  abajo) que permite la máxima energía por *bit* transportado con una penalidad fija debido a la no linealidad, para obtener la mejor BER (*Bit Error Rate*).

En la misma figura se muestran las no linealidades más importantes que limitan la transmisión para varios valores de dispersión de la fibra (Eje Y).

En una fibra óptica, el IOR (*Index of refraction*) o índice de refracción, varía con cambios en la potencia, que como se ha mencionado se conoce como no linealidad, lo que puede producir que la señal óptica se conmute ON/OFF. Cuando la potencia óptica cambia mucho en la conmutación ON/OFF, el IOR cambia mucho también produciendo degradación en la señal óptica después de ser transmitida a través de la fibra, por otro lado, si la potencia óptica media transmitida a la fibra se mantiene constante, un pulso óptico RZ con un ciclo de trabajo de 50% tendrá el doble de potencia pico de una señal NRZ [19], asumiendo que la potencia óptica promedio es la misma que en NRZ, por lo tanto se mejora el OSNR para esta modulación RZ. La modulación NRZ-OOK (*Non-Return Zero-On Off Keying*) es la forma más simple de la modulación ASK (*Amplitud Shift Keying*) utilizando codificación NRZ, y representa la información por presencia o ausencia de señal óptica. En esta forma simple la presencia de la portadora por un tiempo específico representa un binario mientras que la ausencia por el mismo tiempo representa un *bit* 0. Este formato de modulación es utilizado en la mayoría de los sistemas de transmisión ópticos con tasas de *bits* hasta 10G. La ventaja principal de NRZ-OOK es que necesita la menor cantidad de componentes electrónicos y ópticos para generar y detectar señales ópticas. Sin embargo, al mismo tiempo pone grandes obstáculos en el ancho de banda de estos componentes. Para mejorar este problema se han desarrollado varios formatos de modulación avanzados para transmisión de 100G.

Una mejora de 10G NRZ-OOK a 40G NRZ-OOK resulta en un requerimiento adicional de 6dB en OSNR, debido a 6dB de reducción de potencia por bit a 40G relativo a 10G para la misma potencia media lo cual es poco práctico, debido a sus costos de implementación, para 40Gb/s y más aun para 100Gb/s [20].

### 3.3.2.2 CSRZ (*Carrier-Suppressed Return-to-Zero*)

CSRZ emplea codificación RZ, caracterizada por una caída a cero en intensidad entre dos *bits* consecutivos (RZ), y la fase alterna por  $\pi$  entre *bits* vecinos. En su forma estándar es generado por un solo MZM, manejado por dos ondas sinusoidales a la mitad del BR (*Bit Rate*) o tasa de *bits*.

La propiedad característica de una modulación CSRZ es que tienen un espectro similar al de una señal RZ, excepto por los picos de frecuencia que son desplazados BR/2 con respecto a RZ, de modo que ningún pico está presente en la portadora

y la potencia es idealmente cero en la frecuencia de la portadora. Por tanto, las señales 40/100G son menos sensitivas a los efectos de no linealidad de la fibra y esto provee gran robustez sobre algunos impedimentos en la transmisión como CD, PMD y filtrado óptico. En adición provee mejoras al desempeño del OSNR con una tolerancia de dispersión mejorada ligeramente en comparación con NRZ. Sin embargo, CSRZ tiene una limitación fundamental: no puede operar con separaciones de 50GHz debido al ancho espectral de la señal, que son necesarios para soportar sistemas DWDM de 80 canales, por lo tanto solo podría manejar sistemas DWDM de 40 canales y 100GHz de separación por canal [21].

### 3.3.2.3 VSB (*Vestigial Sideband*) y SSB (*Single Sideband*)

Es posible para algunos formatos de modulación suprimir la mitad del contenido del espectro por medio de una apropiada filtración óptica. Dado que el espectro de la señal de banda base en valor real es simétrica en torno a la frecuencia cero, descartando la mitad redundante del espectro (es decir, uno de los dos espectros laterales) se conserva el contenido de la información. Esto es explotado en SSB, donde un lado del espectro es completamente suprimido y en VSB, se utiliza un filtro óptico con una atenuación gradual, este se desplaza de la frecuencia portadora óptica para suprimir partes importantes de una banda lateral. De esta forma una señal en valor real (*chirp-free*) con doble banda lateral es convertida en un formato de valor complejo (*chirped*) VSB o SSB. Aunque el filtrado SSB es difícil de implementar en la práctica debido a las dificultades en realizar las funciones apropiadas de filtrado óptico o eléctrico, el VSB óptico se ha demostrado con modulaciones NRZ-OOK [22], RZ-OOK [23], y CSRZ [24].

En un sistema WDM, el filtrado VSB puede ser usado en el Tx o en el Rx; el filtrado en el Tx permite una mayor compresión espectral y una alta eficiencia espectral o SE (*spectral efficiency*), que cuando se utiliza VSB en el Rx, lo cual resulta especialmente ventajoso para transmisión WDM. La ventaja para VSB cuando se filtra en Rx es que reduce la diafonía de canal en los sistemas WDM.

#### 3.3.2.3.1 OSSB (*Optical Single Sideband*)

OSSB está siendo estudiado con el propósito de minimizar el impacto de algunos problemas en el desempeño del sistema. Esta modulación presenta una tolerancia significativa a la dispersión de velocidad de grupo o GVD (*Group Velocity Dispersion*) debido a la supresión de una de las bandas laterales de la señal.

La velocidad de grupo en sí es usualmente función de la frecuencia de la onda. Esto resulta en GVD, que causa un pulso corto de luz que se amplía en el tiempo como el resultado de los diferentes componentes de frecuencia de los pulsos viajando a diferentes velocidades.

GVD también se cuantifica como el parámetro de retardo del grupo de dispersión (D):

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}. \quad (7)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda,  $c$  es la velocidad de la luz y  $n$  es el índice de refracción del medio.

El resultado del GVD, sea positivo o negativo, es en última instancia la ampliación temporal del pulso. Esto hace que el manejo de la dispersión sea extremadamente importante en los sistemas de comunicación ópticos basados en fibra, debido a que este fenómeno puede llegar a generar que un flujo de *bits* sea irreconocible.

OSSB se ha propuesto como un buen candidato para varios sistemas debido a la reducción del ancho de banda ocupado, cercano a la mitad, comparado con formatos binarios convencionales, esta reducción conlleva a un aumento de la tolerancia de dispersión en un factor de 4 veces [36].

Sin embargo, debido al significativo contenido espectral cerca a la frecuencia de la portadora en señales IM-ODSB (*Intensity-Modulated Optical Double Sideband*) y el deterioro de la amplitud limitada por filtros ópticos convencionales, una supresión de banda lateral significativa es difícil de obtener [37].

Adicionalmente, la supresión de la banda lateral es limitada por la estabilidad de la longitud de onda de la fuente óptica.

Para minimizar el impacto de dicho efecto, deben usarse filtros ópticos autoecualizables, lo que agrega complejidad al transmisor [37].

Otros tipos de transmisores OSSB usan circuitos electrónicos para generar las señales eléctricas que, cuando son combinadas en un modulador óptico, generan una señal OSSB. Sin embargo, debido a las limitaciones de frecuencia impuestas por la circuitería electrónica, la fabricación de los transmisores OSSB con altas tasas de bits es muy compleja.

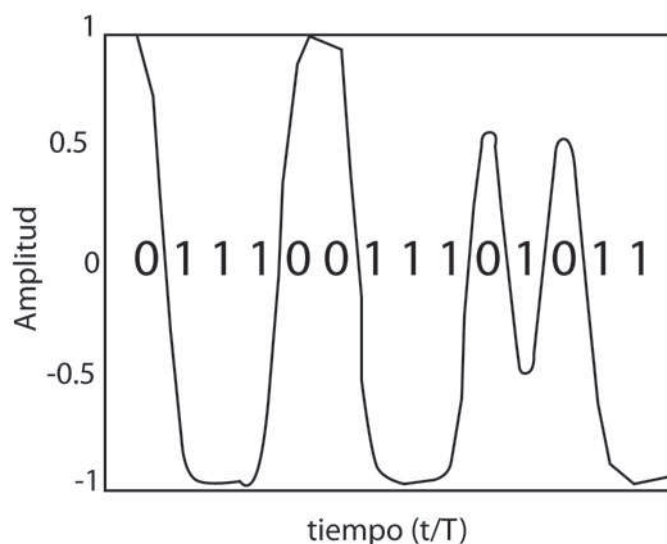
Como consecuencia OSSB tiene poco interés en sistemas de larga distancia debido al limitado alcance de la transmisión [37].

#### 3.3.2.4 Dúo Binary

La modulación Dúo Binary (también conocida como *Phase-Shaped Binary Transmission*, o PSBT) maneja la fase de la señal óptica y reduce la potencia media de la señal a la mitad comparada con señales NRZ (Véase figura 12). El ancho de

banda de la señal también se reduce significativamente, esto conduce a algunas mejoras para la transmisión en 40G, la tolerancia a CD es de aprox. 160ps/nm y permite la separación de 50GHz que es necesaria para sistemas DWDM, además, estos sistemas pueden soportar cualquier combinación de longitudes de onda 10/40G sin la necesidad de subbandas de longitud de onda, lo que no es posible con otros tipos de modulación. Sin embargo para 100G la SE de la modulación PSBT no es suficiente porque no es adecuada para 50GHz de separación.

Figura 12. Esquema modulación PSBT



Source: D. Pennicnckx, M. Chbat, L. Pierre, "The Phase-Shaped Binary Transmission (PSBT) A New Technique to transmit far beyond the chromatic dispersion limit", pp 259-261, 1997.

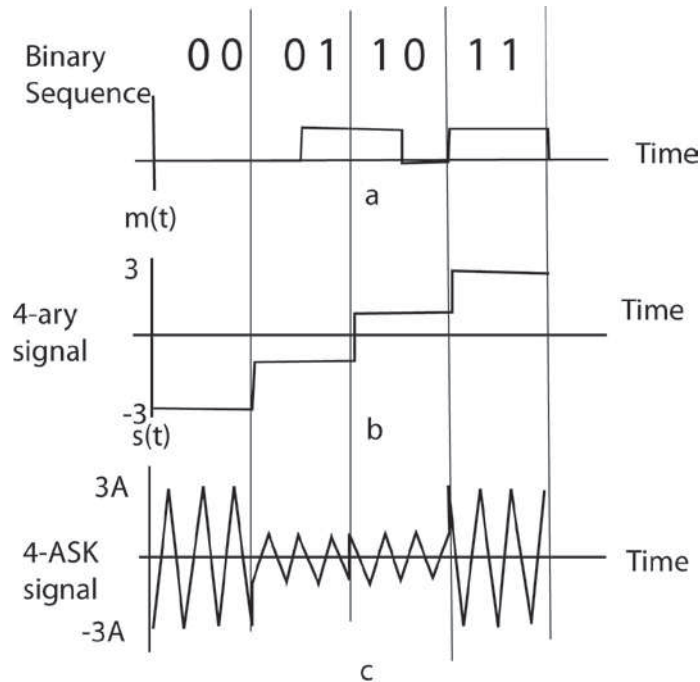
### 3.3.2.5 M-ASK

Las modulaciones básicas como ASK se pueden sofisticar mediante el uso de más niveles de señal o en combinaciones de varias modulaciones. En otros esquemas cada símbolo transmitido equivale a un bit transmitido. En los esquemas de modulación multinivel, cada símbolo lleva la información de  $M$  bits, y el número de amplitudes, frecuencias o fases posibles es  $2^M$ . Por ejemplo, en una transmisión 4-ASK existen cuatro fases posibles:  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ; en este ejemplo cada cambio de fase equivale a transmitir dos bits.

Los esquemas multinivel suponen una mayor tasa de bits transmitida, pues envían  $M$  bits en cada tiempo de símbolo; sin embargo, el valor de  $M$  está limitado puesto

que al aumentar  $M$  disminuye la diferencia entre las amplitudes, frecuencias o fases de símbolos según si se trata de una modulación de amplitud, frecuencia y fase y el sistema es más vulnerable al ruido, y distorsiones de fase debido a la transmisión.

Figura 13. Modulación 4-ASK: (a) Secuencia binaria, (b) Señal 4-ary (b) Señal 4-ASK.



Source: *Amplitude-Shift Keying (ASK) Modulation on Mac* [On line] <[http://www.elec.mq.edu.au/~cl/files\\_pdf/elec321/lect\\_mask.pdf](http://www.elec.mq.edu.au/~cl/files_pdf/elec321/lect_mask.pdf)>

La figura 13 muestra un ejemplo de modulación multinivel 4-ASK, el problema con estas modulaciones en intensidad multinivel es que no ha resultado beneficioso para aplicaciones de transporte de fibra óptica hasta el momento, esto debido básicamente a penalidades substanciales en el Rx, comparadas con OOK [18].

### 3.3.3 Formatos de modulación en fase diferencial

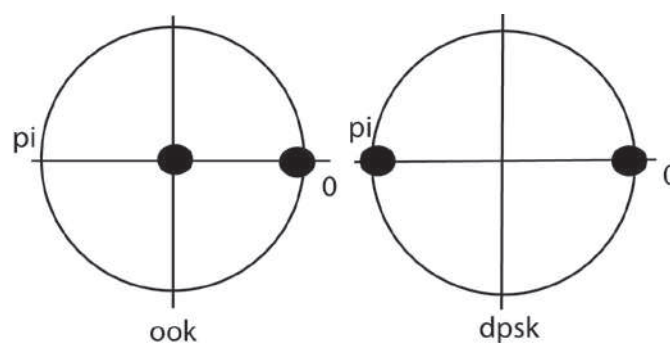
Debido a la ausencia de una referencia de fase óptica en el Rx, la referencia de fase tiene que ser proporcionada por la propia señal.



3.3.3.1 DPSK (*Differential Phase Shift Keying*)

En contraste con técnicas de modulación en amplitud como NRZ o dúo-binaria, DPSK codifica la información directamente en la fase de la luz óptica. Como OOK, DPSK puede ser implementada con codificación NRZ o RZ y no hay impacto en la amplitud. Esta técnica provee una mejora en OSNR de 3dB [25] y tolerancia mayor contra las deficiencias del sistema que OOK.

Figura 14. OOK vs. DPSK mejora de OSNR

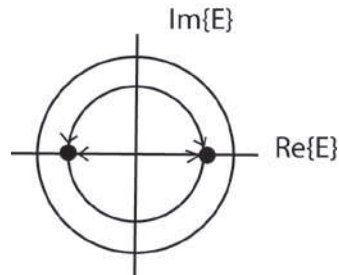


Source: 40G today, 100G tomorrow high-speed transmission in DWDM networks, Nokia-Siemens, 2009, p 4.

En el diagrama de constelación de la figura 14, cada símbolo transmitido es representado por información en amplitud (distancia desde el centro) y por la información de fase (relativo al ángulo con el eje x  $[0 - 2\pi]$ ). Los dos símbolos de OOK y DPSK son mostrados también en la figura 13. Además, la distancia del símbolo al centro del círculo representa la amplitud, y la distancia entre los símbolos es relativa a OSNR. Si la amplitud es la misma, DPSK dobla la distancia entre los símbolos y por esto se mejora OSNR en 3dB.

Para generar la modulación DPSK se pueden utilizar PM (Phase Modulator) o MZM, la diferencia básica entre las dos formas es que un PM modula la fase a lo largo de un círculo en el plano complejo, dejando constante la intensidad de la luz modulada en fase. Sin embargo, la fase óptica directamente sigue la señal de control eléctrica, la velocidad de transición de las fases está limitada por el ancho de banda combinado del amplificador de control y el PM, y cualquier rebasamiento en la forma de onda del controlador se manifiesta en distorsiones de fase, mientras que en un MZM, que es controlado simétricamente cerca de transmisión cero, modula a lo largo del eje real a través del origen del campo óptico complejo, siempre produce saltos exactos de  $\pi$  en fase a expensas de la intensidad óptica residual (Véase figura 15). Como la modulación exacta de la fase es más importante para la modulación DPSK que una intensidad óptica constante, los TxS son más convenientes implementarlos usando MZM que PM [26].

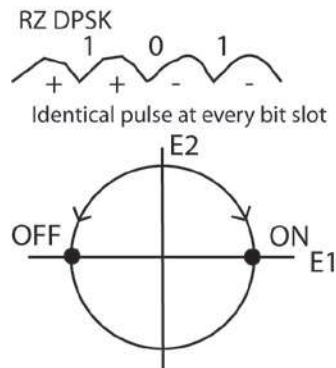
Figura 15. Diferencia en implementación de la modulación DSPK por PM o MZM



*Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks*, Peter J. Winzer, *Senior Member*, IEEE, *Member*, OSA, and Renè-Jean Essiambre, *Senior Member*, IEEE, *Fellow*, OSA, p 12.

La figura 16 muestra que la modulación DPSK codifica la información en el cambio de fase binaria entre *bits* adyacentes: un *bit* 1 es codificado en un cambio de fase de  $\pi$ , mientras que un *bit* 0 es representado por la ausencia de cambio de fase, por eso cada *bit* actúa como una referencia de fase para el próximo *bit*.

Figura 16. Esquema de la modulación DPSK



*Source: Differential Phase-Shift Keying for High Spectral efficiency Optical Transmissions*, Chris Xu, Xiang Liu, *Member*, IEEE, pp 2, 2004.

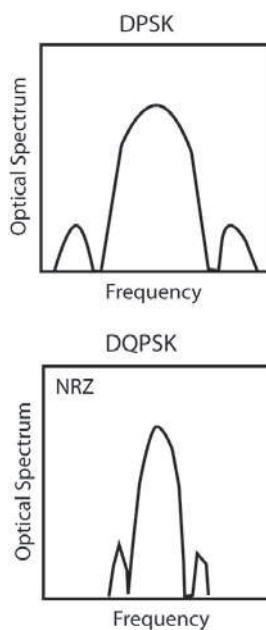
### 3.3.3.2 DQPSK (*Differential Quadrature Phase Shift Keying*)

DQPSK es el único formato de modulación multinivel real (más de un 1 *bit* por símbolo, véase figura 18) que ha recibido una apreciable atención en comunicaciones ópticas; puede ser implementada con codificación NRZ o RZ y no hay impacto en la amplitud. La técnica para este formato multinivel es básicamente el mismo que en

DPSK, pero la fase no es dividida por 2 sino por 4, permitiendo una codificación de 2 *bits* por símbolo. Esto reduce la tasa de baudios por la mitad, además reduciendo el BR de línea 50% pero manteniendo el BR de datos igual, DQPSK provee una mejora en la tolerancia a CD [27], la larga duración del símbolo comparado con formatos de modulación binarios hace que DQPSK sea más robusto a PMD [28]. La figura 17 muestra una comparación entre los espectros ópticos de las modulaciones DPSK y DQPSK.

Nótese que la forma de los espectros ópticos de las modulaciones DPSK y DQPSK son idénticos, pero el espectro de DQPSK es comprimido en frecuencia por un factor de 2 debido a que el BR de símbolos es reducido a la mitad para transmisión a tasas de *bits* fijas. El espectro comprimido es benéfico para obtener una alta SE en sistemas WDM [29].

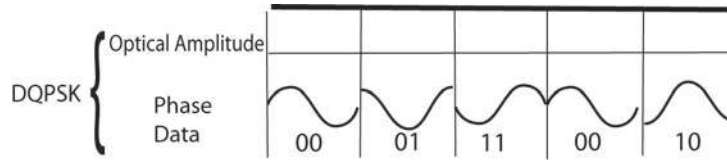
Figura 17. Comparación de los espectros ópticos de las modulaciones DPSK y DQPSK



*Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks*, Peter J. Winzer, *Senior Member, IEEE, Member, OSA*, and Renè-Jean Essiambre, *Senior Member, IEEE, Fellow, OSA*, p 4.

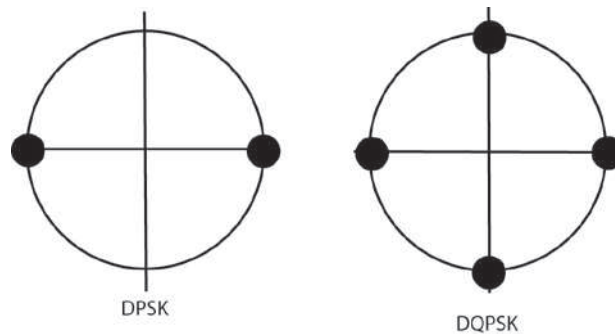
La figura 19 muestra que la distancia entre símbolos es reducida comparada con DPSK, dependiendo del tipo de receptor, esto puede resultar en una necesidad mayor de OSNR comparado con DPSK.

Figura 18. Esquema de la modulación DQPSK



Source: *Trends and Issues in Ultra-High Speed Transmission Technologies*, Anritsu, pp 3, 2209.

Figura 19. Diagrama de constelación modulación DQPSK



Source: *40G today, 100G tomorrow high-speed transmission in DWDM networks*, Nokia-Siemens, 2009, p 9.

Ambas modulaciones DPSK y DQPSK son candidatas para la producción de equipos en masa, pero DQPSK al ser una modulación multinivel requiere transmisores y receptores más complejos y técnicamente más sofisticados comparados con modulaciones en amplitud. Para 100G DQPSK no es una opción práctica debido a la incompatibilidad con los 50GHz de separación. Aunque teóricamente la tasa de baudios de la señal 100G DQPSK está en el rango de 50GHz, el tamaño real actual es más amplio, debido a las penalidades sufridas al pasar por los filtros de 50GHz de los ROADMs, por esto no es compatible con los sistemas WDM de 80 canales actuales [1].

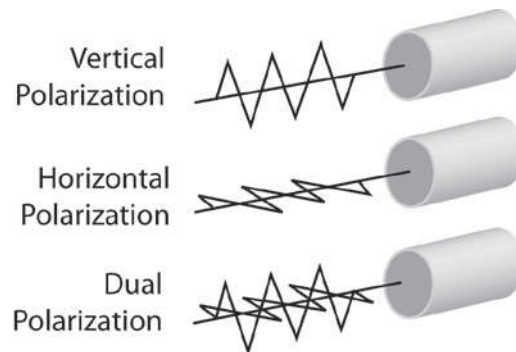
### 3.3.4 Formatos de modulación en polarización

Con 100G el próximo paso en tecnologías de modulación no es solamente usar la información de la fase de la señal sino usar dos diferentes planos de polarización.

### 3.3.4.1 POLMUX-QPSK o DP-QPSK (Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying)

*Dual Polarization* se refiere a la combinación de dos señales ópticas independientes de exactamente la misma frecuencia, pero con polarizaciones ortogonales (véase figura 20). Estas dos señales ópticas son obtenidas a partir de un solo láser transmisor y cada señal es independientemente modulada para transportar la mitad de la información total [1].

Figura 20. Esquemas de polarización



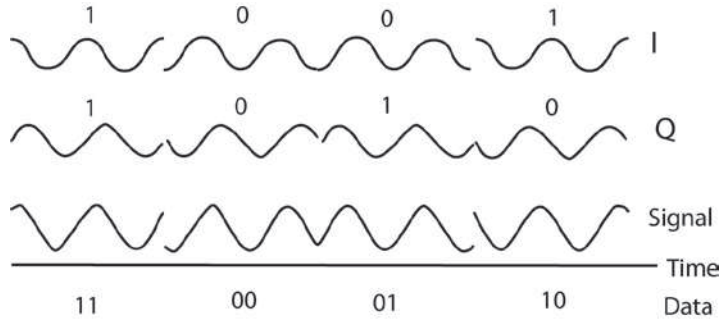
Source: *Solving the 100Gbps Transmission Challenge*, Nortel, 2009.

Dividir la información en dos polarizaciones ópticas permite que cada polarización opere con la mitad de la tasa de datos requerida para una polarización simple.

Reduciendo a la mitad la tasa de datos se reduce el ancho de banda óptico necesario para transmitir la señal permitiendo un menor espacio entre canales manteniendo así el requerimiento de 50GHz de separación entre canales para canales 100Gb/s.

La modulación QPSK permite la reducción de la tasa de transmisión de símbolos por un factor de 2, lo que reduce el espectro de la señal y reduce la velocidad requerida por los componentes ópticos y electrónicos. La combinación de *Dual Polarization* y QPSK reduce la tasa de símbolos requeridos por un factor de 4, permitiendo la aplicación de tecnologías de bajo costo. Al mismo tiempo una tasa de símbolos baja reduce la sensibilidad de la señal a problemas de propagaciones ópticos [16].

Figura 21. Ejemplo modulación DP-QPSK



Source: 100Gbps *Ultra Long Haul DWDM Framework Document*, OIF, *White Paper*.

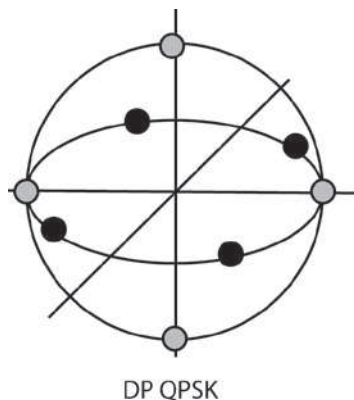
La figura 21 muestra modulaciones QPSK independientes en fase (I) y en cuadratura (Q) que son sumadas para formar una señal transmitida con modulación DP-QPSK.

Al ser aplicado QPSK a cada uno de los planos de polarización se obtiene un total de  $2 \times 2$  *bits/símbolo* como tasa de línea. Para señales 100G esto reduce la tasa de baudios a 25GHz, 25% de la tasa original.

Sin embargo, los beneficios que se logran al reducir la velocidad de transmisión se producen a costa de una mayor complejidad de los elementos transmisor y receptor. El transmisor está formado por dos moduladores QPSK cuya señal de salida se multiplexa en modo de polarización [32].

La información transmitida en una interfaz WAN necesita información adicional para la codificación de línea. Para señales 100G *bits/s* es típicamente el 4% y el FEC es de 7%. Hoy en día se asumen 112G *bits/s* para el BR total necesario para transportar 100Gbits/s esto resulta en una tasa de símbolos total de  $112G \text{ bits/s} / 4 = 28G$  baudios para DP-QPSK.

Figura 22. Diagrama de constelación para modulación POLMUX-QPSK



Source: 40G today, 100G tomorrow high-speed transmission in DWDM networks, Nokia-Siemens, 2009, p 10.

La Figura 22 muestra el diagrama de constelación de la modulación DP-QPSK los círculos claros representan una señal QPSK codificada en el primer plano de polarización, mientras que los círculos oscuros representan la codificación en el segundo plano.

### 3.3.4.2 POLMUX-RZ-DQPSK

Un candidato potencial para reducir la tasa de símbolos y mejorar la tolerancia a la dispersión es POLMUX-RZ-DQPSK. Este formato de modulación dobla el número de bits por símbolos transmitiendo información independiente en cada una de las dos polarizaciones ortogonales. La modulación POLMUX-RZ-DQPSK permite transmitir 111Gb/s con solo 27.75 GBaudios/s codificando 4 bits/símbolo. Esto permite incrementar la eficiencia espectral y la tolerancia a CD y PMD [35], además pone la tasa de símbolos al alcance de los conversores análogo-digital de alta velocidad modernos (ADCs), facilitando el uso de técnicas de procesamiento de señales digitales.

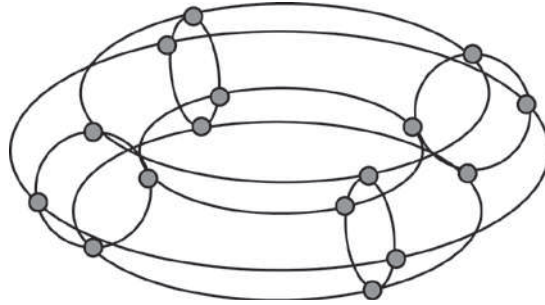
La señal POLMUX-RZ-DQPSK se obtiene por medio de dos moduladores DQPSK separados. Después ambas señales DQPSK son multiplexadas juntas en dos polarizaciones ortogonales generando así una señal POLMUX-RZ-DQPSK.

En el receptor, POLMUX requiere un de-multiplexor de polarización para separar ambos flujos de información. Esto es realizado en el dominio óptico, usando un control



de polarización seguido por un divisor de haz de polarización. El de-multiplexor de polarización divide la señal POLMUX-RZ-DQPSK en dos señales DQPSK que son demoduladas por separado [33].

Figura 23. Constelación señal POLMUX-RZ-DQPSK



*Source: 40/100Gbps Long Haul Optical Transmission Systems Design Using Digital Coherent Receivers, Dirk van den Borne, Nokia Siemens Networks GmbH & CO. KG*

En comparación con otros formatos de modulación multinivel POLMUX-RZ-DQPSK es particularmente interesante ya que utiliza cuatro dimensiones ortogonales de señalización (I y Q en cada una de las polarizaciones). Una representación 4-dimensional de la constelación de la modulación POLMUX-RZ-DQPSK es presentada en la figura 23.

#### 4. Detección directa *vs.* detección coherente

En contraste con la tecnología existente de detección directa, un esquema de detección coherente puede detectar no solo la amplitud de la señal óptica sino también la fase y la polarización también. Con un sistema de detección coherente se incrementa la capacidad de detección y la eficiencia espectral, más información puede ser transmitida con el mismo ancho de banda óptico. Además, como la detección coherente permite detectar la fase y la polarización de la señal óptica y luego ser medida y procesada, los impedimentos en la transmisión que anteriormente presentaban retos, pueden, en teoría, ser mitigados electrónicamente.

A pesar de la multitud de desafíos (respecto a frecuencias, ruidos, amplificación), un sistema de detección coherente tiene muchas ventajas sobre las tecnologías de detección tradicionales:

- Un incremento de la sensibilidad del receptor de 15 a 20dB comparado con sistemas incoherentes.
- Compatibilidad con formatos de modulación complejos como DPSK o DQPSK.



- La detección simultánea de la amplitud, fase y polarización de la señal óptica permite obtener información más detallada, que se transportará y extraerá, lo que aumenta la tolerancia a las deficiencias de la red, tales como la dispersión cromática, y mejorar el rendimiento del sistema.
- Mejor rechazo a la interferencia de canales adyacentes en sistemas DWDM, permitiendo que más canales sean empaquetados dentro de la banda de transmisión.

Una señal DP-QPSK puede ser detectada directamente o de forma coherente. Con detección directa la señal tiene que ser dividida en los planos de polarización correctos: Primero en el dominio óptico y luego la señal se introduce en una matriz de fotodiodos para la detección balanceada. En cada fotodiodo solo la amplitud de la señal es trasladada desde el dominio óptico hasta el dominio eléctrico.

En contraste, con la detección coherente la señal óptica entrante es primero dividida en dos componentes arbitrarios de polarización. Cada uno de los componentes es entonces combinado con un láser oscilador local. Esta técnica permite aislar los componentes en fase y cuadratura para cada uno de los planos de polarización (X y Y). Finalmente, la señal óptica es detectada por fotodiodos y alimentada en un elemento de postprocesamiento eléctrico.

Con la detección coherente el estado de las amplitudes, fase y polarización de cada símbolo es detectado inmediata y claramente. Este es un beneficio muy importante. La de-multiplexión de la polarización, la compensación de CD, los impedimentos de PMD, así como la recuperación del transporte son todos realizados en el dominio eléctrico. La detección coherente es entonces más flexible con respecto a las optimizaciones de rendimiento, pero los receptores son complejos y costosos [30].

Finalmente, las modulaciones en fase y en polarización (DPSK, DQPSK y DP-QPSK) han recibido considerable atención en los últimos años, debido principalmente a la mejora de la sensibilidad del Rx respecto a OOK.

## 5. Análisis

La propagación de 40Gb/s con modulación DPSK sobre los tipos más comunes de fibra indican que esta modulación tienen una resistencia contra no linealidades de la fibra similar a la modulación CSRZ cuando operan a con un OSNR en el Rx que produce un BER cercano a  $10^{-3}$ , que es apto para decodificar y resulta en un mejor rendimiento del sistema.

40Gb/s tiene un futuro prometedor ya que esta tecnología en conjunto con modulaciones como DPSK, DQPSK y DP-QPSK se está convirtiendo en un producto maduro con muchas opciones de rendimiento. Los proveedores de servicios podrán



elegir DPSK para fibras estándar y aumentar la tolerancia a PMD con PMDC. Otra alternativa es el uso de módulos DQPSK con una tolerancia de PMD alrededor de los 8ps DGD, están disponibles desde finales de 2009 y principios del 2010, además Nortel y Nokia-Siemens anunciaron productos para 40Gb/s DP-QPSK en estas mismas fechas, con una gran tolerancia a CD y PMD lo que agranda el panorama de estas tecnologías.

Con el estándar de 100Gb/s se puede anticipar una alta aceptación para estas velocidades entre el 2011/2012 comparado con 40Gb/s.

Uno de los objetivos principales de los formatos de modulación avanzados es reducir la tasa de símbolos, ya que baja los requerimientos de ancho de banda de los componentes ópticos y electrónicos y mejora la resistencia contra CD y PMD. El uso de DQPSK es considerado por muchos fabricantes como la modulación más prometedora para alcanzar la transmisión de 100Gb/s.

**Tabla 3.** Comparación de algunas de las principales modulaciones

Formato	10G NRZ OOK	RZ-DPSK	RZ-DQPSK	RZ-PolMux-DQPSK	RZ-PolMux-QPSK
Aplicación	Ref.	Core / Metro	Core / Metro	Core	Core
Tasa de símbolos	11GBd	111GBd	56GBd	28GBd	28GBd
WDM grid [GHz]	50	200	100	50	50
OSNR <sub>min</sub> [dB] (BER 1e-3)	12	17	18	18	16
PMD [ps]	12	1.5	2.5	2.5	>> 10
Tolerancia a ruido fase / No linealidad	++	+	0	0	0

Source: 100Gbps and 40 Gbps Transport Extending Data Networks into the Regional Domain, TNC, 2008.

Las tecnologías de POLMUX-QPSK y POLMUX-RZ-DQPSK son muy atractivas para reducir la tasa de símbolos y en próximos avances tecnológicos se espera que incremente la robustez y sean el método más costo-efectivo para los sistemas de transmisión de 100Gb/s (véase tabla 3).

## 6. Conclusiones

Altas capacidades en la fibra y un costo atractivo por *bit* de información transportado son posibles por la eficiencia espectral del transporte WDM en redes ópticas flexibles y los formatos de modulación avanzados juegan un rol importante en el diseño de estas redes. Se discutieron la generación y detección de los formatos de modulación

óptica más importantes para tasas de transmisión de 40/100Gb/s por canal, donde la tecnología disponible genera restricciones importantes en la implementación.

La transmisión serial de tasas de *bits* de 40/100Gb/s requiere más esquemas de modulación avanzadas cuando se compara con la tecnología 10Gb/s estándar. En particular para aplicaciones metro y regionales la eficiencia en costos y la posibilidad de re-uso de las infraestructuras existentes es esencial. Las modulaciones multinivel que reducen la tasa de símbolos pueden ser generadas y detectadas con facilidad y son la llave para los sistemas costo-efectivos operando en DWDM a 50GHz.

Muchas de las tecnologías 100Gb/s pueden aumentar las no linealidades ópticas que otras, todos esos problemas deben ser considerados para determinar la mejor solución del sistema.

## Referencias

- [1] NOKIA SIEMENS NETWORKS. "40G today, 100G tomorrow high-speed transmission in DWDM networks", *White paper*, 2009.
- [2] ETHERNET ALLIANCE. "40 Gigabit Ethernet and 100 Gigabit Ethernet Technology Overview", *White paper*, 2008.
- [3] IEEE 802.3 HSSG. "Spectral-Efficient 100G Parallel PHY in Metro/regional Networks" [En línea]. < [http://grouper.ieee.org/groups/802/3/hssg/public/jan07/way\\_01\\_0107.pdf](http://grouper.ieee.org/groups/802/3/hssg/public/jan07/way_01_0107.pdf)> [Citado el 11 de enero de 2007].
- [4] IEEE 802.3 HSSG. "40/100G Architecture and Interfaces proposal" [En línea]. <[http://www.ieee802.org/3/ba/public/jan08/ganga\\_01\\_0108.pdf](http://www.ieee802.org/3/ba/public/jan08/ganga_01_0108.pdf)> [Citado el 16 de enero de 2008].
- [5] ASHWIN GUMASTE, Tony Antony. "DWDM Network Designs and Engineering Solutions", Cisco press, 2002, ISBN 1-58705-074-9.
- [6] AT&T LABS. *System Technologies for 100G Transport Networks, White Paper*, 2009.
- [7] DESURVIRE, E., "Erbium-Doped Fiber Amplifiers and Device and System Developments". Hoboken, NJ:Wiley, 2002.
- [8] HARIS, Muhammad. "Advanced modulation formats for high-bit-rate optical networks", pp. 23-24, 2008.
- [9] *ENCYCLOPEDIA OF LASER PHYSICS AND TECHNOLOGY. Zero Dispersion Wavelength* [En línea]. < [http://www.rp-photonics.com/zero\\_dispersion\\_wavelength.html](http://www.rp-photonics.com/zero_dispersion_wavelength.html)>
- [10] MAILLOUX, D., "Chromatic dispersion compensation in extended-reach architectures", pp. 1, 2008.
- [11] *EXFO EXPERTICE REACHING OUT. Modulation Formats: Overcoming CD at 40 Gbit/s* [En línea]. <<http://www.exfo.com/en/Library/WaveReview/2007-January/WRArticle4.asp>>
- [12] KOGELNIK, H. "Polarization-mode dispersion in Optical Fiber Telecommunication", Eds. New York: Academic, 2002, pp. 725-861.
- [13] SAVORY, S. J. "Digital Equalization of 40Gb/s per wavelength transmission over 2480km of standar fibre", ECOC2006, Th2.5.5.
- [14] KOGELNIK, H. "Polarization-mode dispersion, in Optical Fiber Telecommunication", I. Kaminow and T. Li, Eds. New York: Academic, 2002, pp. 725-861.
- [15] AGRAWAL, G. P. "Nonlinear Fiber Optics", New York: Academic, 2001.

- [16] OPTICAL INTERNETWORKING FORUM, "100G Ultra Long Haul DWDM Framework Document", White paper, 2008.
- [17] LUDWIG, R. "Experimental comparison of 40 Gbit/s RZ and NRZ transmission over standard singlemode fibre" *Electron. Lett.* 35(25), 2216–2218 (1999).
- [18] WINZER, Peter J. "Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks", 2006, pp. 3,11-13.
- [19] SINGH, Anjali. "Modulation Formats for High-Speed, Long-Haul Fiber Optic Communication System.", pp. 2-3.
- [20] LUDWIG, R. "Experimental comparison of 40 Gbit/s RZ and NRZ transmission over standard singlemode fibre" *Electron. Lett.* 35(25), 2216–2218 (1999).
- [21] BOSCO, G. "On the use of NRZ, RZ, and CSRZ modulation at 40 Gb/s with narrow DWDM channel spacing", 2002.
- [22] BIGO, S. "Multiterabit DWDM terrestrial transmission with bandwidth-limiting optical filtering", *Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 10, n.º 2, pp. 329–340, 2004.
- [23] TSURITANI, T. "Performance comparison between DSB and VSB signals in 20 Gb/s based ultra-long-haul WDM systems", *Optical Fiber Commun. Conf. (OFC)*, Anaheim, CA, 2001, Paper MM5.
- [24] AGRAWAL, A. "42.7 Gb/s CSRZ-VSB for spectrally efficient meshed networks", *Eur. Conf. Optical Commun. (ECOC)*, Stockholm, Sweden, 2004, Paper We3.4.4.
- [25] WINZER, Peter J. "Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks", 2006, p. 6.
- [26] GNAUCK, A. H. "Optical phase-shift-keyed transmission", *J. Lightw. Technol.*, vol. 23, n.º 1, pp. 115–130, Jan. 2005.
- [27] GRIFFIN, R. A. "Optical differential quadrature phase shift key (oDQPSK) for high-capacity optical transmission", *Optical Fiber Commun. Conf. (OFC)*, Anaheim, CA, 2002, Paper WX6.
- [28] WANG, J. "Impact of chromatic and polarization-mode dispersions on DPSK systems using interferometric demodulation and direct detection" *J. Lightw. Technol.*, vol. 22, n.º 2, pp. 362–371, Feb. 2004.
- [29] KRAMER, G. "Spectral efficiency of coded phase-shift keying for fiber-optic communication" *J. Lightw. Technol.*, vol. 21, n.º 10, pp. 2438–2445, Oct. 2003.
- [30] KASZUBOWSKA-ANANDARAJAH, A. "Cost Efficient Narrow Linewidth Laser Transmitter for Coherent Detection", Dublin City University, Dublin, Ireland, pp 1, 2008.
- [31] RAMOS, Francisco. "Estudio de efectos no lineales en dispositivos fotónicos y su aplicación en sistemas radio sobre fibra óptica" Tesis doctoral, (julio, 2000).
- [32] IGLESIAS, Enrique, "Requisitos de los Sistemas de Comunicaciones Ópticas de muy alta velocidad", Tesis, (enero, 2009).
- [33] VAN DEN BORNE, D., JANSEN, S. L. "DQPSK modulation for robust optical transmission", COBRA institute, Eindhoven University of Technology, The Netherlands, pp 2-3, 2009.
- [34] VAN DEN BORNE, D. "1.6-b/s/Hz Spectrally Efficient Transmission Over 1700 km of SSMF Using  $40 \times 85.6$ -Gb/s POLMUX-RZ-DQPSK", *JLT*, vol. 23, pp. 4004-4015, 2005.
- [35] R. S. FLUDGER, C., DUTHEL, T. "Coherent Equalization and POLMUX-RZ-DQPSK for Robust 100-GE Transmission", Student Member, IEEE, enero, 2008.
- [36] FONSECA, D. "Recent Developments on Optical Single Sideband Transmission Systems", Siemens S. A., R. Irmãos Siemens 1, 2720-093 Amadora, Portugal, 2006.
- [37] FONSECA, D. "Adaptive Optoelectrical Filters for Improved Generation of Optical Single Sideband Signals With Different Pulse Shapes", *Research Group of Nokia Siemens Networks Portugal S. A.*, august, 2008.
- [38] FONSECA, D. "On the Use of Electrical Precompensation of Dispersion in Optical Single-Sideband Transmission Systems", *Student Member, IEEE*, julio, 2006.

- [39] Grupo de Comunicaciones Ópticas De La Universidad de Valladolid. Dispersión en la Fibra [En línea]. <[http://pesquera.tel.uva.es/tutorial/Tema\\_I/Dispersion/Dispersion.html#ensanchamiento](http://pesquera.tel.uva.es/tutorial/Tema_I/Dispersion/Dispersion.html#ensanchamiento)>
- [40] FINKENZELLER, M. “Impacto en la red de transporte óptico de nuevos servicios 100GbE”, Nokia Siemens Networks, 2008.

## Glosario

ADC	<i>Analogue-to-Digital Converters</i>
ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BR	<i>Bit Rate</i>
CD	<i>Chromatic Dispersion</i>
CSRZ	<i>Carrier-Suppressed Return-to-Zero</i>
CWDM	<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i>
DCM	<i>Dispersion Compensation Modules</i>
DGD	<i>Differential Group Delay</i>
DP-QPSK	<i>Dual-Polarized Quadrature Phase Shift Keying</i>
DPSK	<i>Differential Phase Shift Keying</i>
DQPSK	<i>Differential Quadrature Phase Shift Keying</i>
DSP	<i>Digital Signal Procesor</i>
DWDM	<i>Dense Wavelength-Division Multiplexing</i>
EFEC	<i>Enhanced Forward Error Correction</i>
GDD	<i>Group Delay Dispersion</i>
GVD	<i>Group-Velocity Dispersion</i>
IM-ODSB	<i>Intensity-Modulated Optical Double Sideband</i>
IOR	<i>Index of refraction</i>
IX	<i>Internet Exchanges</i>
MZM	<i>Mach-Zehnder Modulators</i>
NRZ	<i>Non-Return Zero</i>
OA	<i>Optical Amplifier</i>
OOK	<i>On-Off Keying</i>
OSSB	<i>Optical Single Sideband</i>
OSNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
PM	<i>Phase Modulators</i>
PMD	<i>Polarization Mode Dispersion</i>
PMDC	<i>Polarization Mode Dispersion Compensators</i>
POLMUX	<i>Polarization Multiplexing</i>
PSBT	<i>Phase-Shaped Binary Transmission</i>



RZ	<i>Return Zero</i>
SE	<i>Spectral efficiency</i>
SMF	<i>Single Mode Fiber</i>
SSB	<i>Single Sideband</i>
VSF	<i>Vestigial Sideband</i>
WDM	<i>Wavelength División Multiplexing</i>

