

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE REDES WDM FRENTE A VARIACIONES EN
LOS PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN Y SU INCIDENCIA EN LOS EFECTOS
NO LINEALES.**

ANEXO



**JUAN PABLO AGREDO PALACIOS
HENRY JESUS ORDOÑEZ ORDOÑEZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES – GNTT
POPAYÁN
MARZO de 2012**

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE REDES WDM FRENTE A VARIACIONES EN
LOS PARÁMETROS DE TRANSMISIÓN Y SU INCIDENCIA EN LOS EFECTOS
NO LINEALES.**

ANEXO

**JUAN PABLO AGREDO PALACIOS
HENRY JESUS ORDOÑEZ ORDOÑEZ**

**Documento Final de Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Director
Ing. ALEJANDRO TOLEDO TOVAR**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES – GNTT
POPAYÁN
MARZO de 2012**

ANEXO A: Componentes de una Red WDM

1.1 Codificador

Se encarga de transformar la señal eléctrica en una secuencia de bits óptica para que la información pueda ser transmitida a través de la fibra en una señal láser.

1.2 Moduladores

Existen varias técnicas de modulación, entre las analógicas se tienen: Modulación de Amplitud (AM – Amplitude Modulation), Modulación de Frecuencia (FM – Frequency Modulation), Modulación de Fase (PM – Phase Modulation), Modulación de Doble Banda Lateral (DSB – Double Side Band Modulation), y en las digitales: Modulación por Desplazamiento de Amplitud (ASK – Amplitude Shift Keying), Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (FSK – Frequency Shift Keying), Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK – Phase Shift Keying), Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM - Quadrature Amplitude Modulation). Los formatos simples de modulación, como Codificación Encendido Apagado OOK (On-Off Keying), son usados en la mayoría de los enlaces debido a su fácil implementación, sin embargo el incremento de ancho de banda y las distancias hace que se requiera de otros formatos más eficientes [1, 2, 3].

- Modulador directo: es el modulador más sencillo y en él se controla directamente la alimentación del láser o LED. Utiliza el formato de modulación NRZ¹ - OOK y es utilizado para tasas de transmisión inferiores a 2.5 Gb/s, por lo cual, no es el indicado para trabajar en redes WDM. [1,2].
- Modulador indirecto: en este se cuenta con un modulador externo que se encarga de modular la luz emitida por el láser de onda continua (CW). El modulador externo es el que bloquea o deja pasar la señal según la corriente que se le aplique. El esquema de un modulador indirecto es mostrado en la figura 1.1.

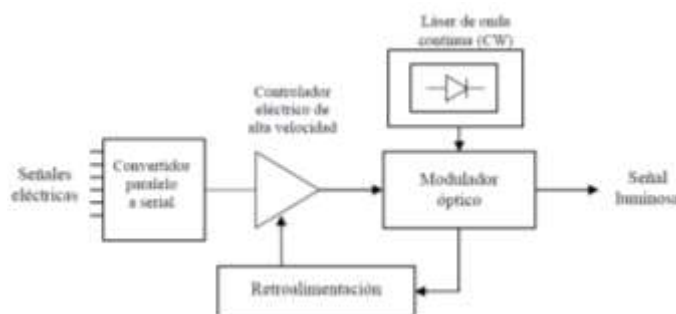


Figura 1.1. Modulador indirecto [1].

¹ No retorno a cero.

Dentro de los moduladores indirectos se encuentra el modulador de electro-absorción (EAM – Electro Absorption Modulator) y el *modulador con Interferómetro de Mach Zenher* (MZI – Mach Zenher Interferometer). En la tabla 1.1 se pueden observar las principales características de este tipo de moduladores.

Tabla 1.1. Especificaciones de los moduladores MZI y EAM [1].

	MZI	EAM
Velocidad de modulación	12.5 Gb/s	40 Gb/s
Longitud de onda λ	1530 a 1610 nm	1530 a 1563 nm
Potencia de entrada óptica	30 mW	20 mW
Potencia de salida óptica	24.5 mW	-
Inserción de pérdida óptica	5.5 mW	10 dB
Ancho de banda óptico	Más de 10 Ghz	Más de 32 Ghz
Materiales	Niobato de litio	Fosforo de Indio

Para el desarrollo de este trabajo de grado se escoge el modulador Mach Zenhder ya que es uno de los más usados y en la actualidad se encuentra en equipos como los de la serie *FTM79²*, de Fujitsu, que trabajan a 40 Gb/s.

1.3 Fuente de luz

Existen dos tipos de fuentes de luz que pueden ser usadas en comunicaciones ópticas, los fotodiodos emisores y los láseres de inyección o diodo laser. En sistemas donde se requieren altas velocidades de transmisión, como en WDM, se usa el láser ya que este tiene un mejor tiempo de respuesta y produce una luz más coherente. Dentro de los láseres se encuentran los sintonizables, que pueden generar diferentes longitudes de onda, y los de onda continua (CW), que tienen la restricción de generar una sola frecuencia. En la tabla 1.1 se tiene una comparación entre los diferentes tipos de láseres y sus principales características [1,2].

Tabla 1.2. Especificaciones de Led, láser sintonizable y láser de onda continua (CW) [1].

	LED	Láser Sintonizable	Láser de onda continua (CW)
Tasa de bits	230 Mbps	2.5 Gb/s	CW
Voltaje	1.8 v	2 v	2 v
Corriente	100 mA	150 mA	300 mA
Potencia de salida	175 μ w	20 mW	30 mW
Tiempo de subida	7 ns	0.1 ns	---
Tiempo de bajada	7 ns	0.1 ns	---
Estabilidad de longitud de onda	\pm 20 nm	\pm 0.1 nm	\pm 25 pm
Amplitud del espectro	50 nm	0.5 nm	10 Mhz

Para el desarrollo de este trabajo de grado se utiliza un láser de onda continua CW que es utilizado en sistemas WDM con altas velocidades de transmisión, además, brinda una mayor vida útil.

² Mayor información en <http://jp.fujitsu.com/group/foc/en/services/optical-devices/40gln/>

1.4 Fibra

La fibra óptica brinda grandes ventajas para la transmisión de datos, como inmunidad al ruido, gran ancho de banda, bajas pérdidas, seguridad de la señal, entre otras. Actualmente la fibra presenta algunas características que pueden limitar un sistema WDM debido a la *dispersión, las pérdidas y la no linealidad*. Entre los principales tipos de fibra usados se encuentran la Fibra Monomodo Estándar (SSMF - Standard Single Mode Fiber), la Fibra de Dispersión Desplazada No Cero (NZ-DSF - Non-Zero Dispersion Shifted Fibers) y la Fibra de Dispersión Desplazada (DSF - Dispersion Shifted Fiber) [2,4].

1.5 Receptor

Para la detección se utilizan fotodiodos PN y PIN. Los detectores pueden ser incoherentes (detección directa) o coherentes (indirecta). En el detector incoherente la decisión entre un 1 o un 0 lógico se hace en función de la ausencia o presencia de luz durante el tiempo de bit, dependiendo de un umbral de potencia. La detección directa permite detectar señales débiles en un entorno ruidoso. Debido a que la señal presenta variaciones en su fase, se dificulta la reconstrucción de la fase a partir de la señal transmitida, limitando la eficiencia de estos sistemas [1,2]. Para este trabajo de grado se utiliza un fotodiodo PIN.

ANEXO B: Formatos de Modulación.

A medida que los sistemas de comunicaciones exigen un incremento en el ancho de banda, se buscan formatos de modulación más eficientes que permitan transmitir mayor cantidad de información y que sean más robustos frente a diferentes degradaciones ópticas. Los sistemas que operan en la actualidad a 10Gb/s utilizan el formato de codificación NRZ, pero este comienza a presentar limitaciones importantes en el alcance de la señal cuando se trabaja a velocidades por encima de los 10Gb/s, debido al impacto de los efectos no lineales. De la misma forma como sucedió con las líneas de cobre, la transmisión por fibra óptica comienza a aplicar esquemas de modulación más complejos que reduzcan las limitaciones por dispersión y efectos no lineales. En el caso de NRZ la señal es más susceptible a la atenuación, dispersión cromática, y otros impedimentos ya que entre más rápido se transmita menor es la energía de cada bit y los pulsos estarán más cerca unos de otros. Esto hace que se requieran formatos con mayor eficiencia espectral (medida de lo bien aprovechada que está una determinada banda de frecuencia usada para transmitir datos) [5, 6].

En los sistemas de comunicaciones ópticos actuales se estudian varios formatos de modulación, los cuales se muestran los más importantes en la figura 2.1.

A continuación se hace una breve descripción de algunos de los formatos de modulación más importantes, estudiados e implementados en sistemas ópticos que trabajan por encima de los 10Gb/s.

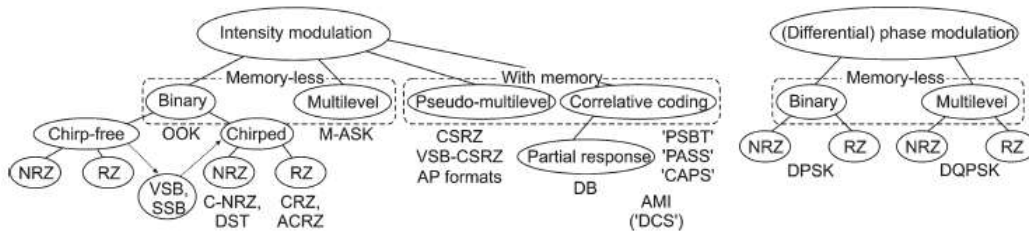


Figura 2.1. Clasificación de los formatos de modulación en fase e intensidad más importantes de las comunicaciones ópticas en la actualidad [7].

2.1 No Retorno a Cero (NRZ)

Este formato de modulación se caracteriza porque su señal no regresa a cero entre bits consecutivos de valor 1, figura 2.2. NRZ ha sido usado extensamente en muchos sistemas de comunicación debido a su relativa facilidad de implementación, por su simplicidad y por su ancho de banda, el cual es cerca del 50% más pequeño que el del formato RZ. NRZ requiere un modulador externo simple con una alta velocidad de tasa de datos y trabaja eficientemente hasta por encima de los 10Gb/s, por lo que es comúnmente usado a esta velocidad. Sin embargo en sistemas de 10Gbps a 40Gbps, NRZ es más afectado por las no linealidades, en comparación a RZ. [5-8]. En las siguientes figuras se muestra la forma de onda de este formato y su espectro en frecuencia.

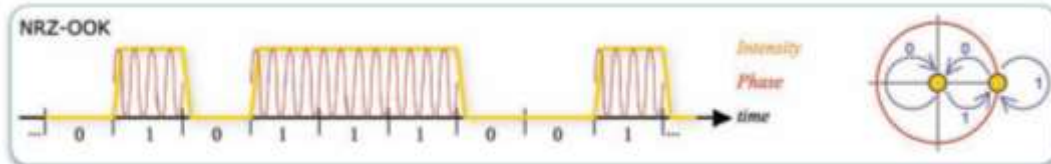


Figura 2.2. Intensidad en el dominio del tiempo y representación de fase de una señal NRZ-OOK [5].

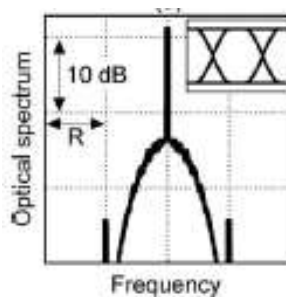


Figura 2.3. Espectro en frecuencia de una señal NRZ-OOK [7].

2.2 Retorno a Cero (RZ)

En la modulación Retorno a Cero (RZ) la señal que representa a cada bit retorna a cero en algún instante dentro del tiempo del intervalo de bit, figura 2.4. Esta

modulación se ha convertido en una solución popular para sistemas de ultra largo alcance a 10 Gb/s y largo alcance a 40Gb/s porque tiene un pico de potencia más alto, una más alta relación señal a ruido, y una tasa de error de bits más baja que NRZ. Este formato también ofrece una mejor inmunidad a los efectos no lineales de la fibra, dispersión de modo de polarización y efectos de interacción entre canales DWDM, como modulación de fase cruzada (XPM). RZ produce una clara señal óptica la cual es fácilmente detectada por el receptor. Sin embargo, los sistemas de ultra alta velocidad que trabajan con señales RZ tienen problemas con la interferencia de bits vecinos. La figura 2.5 muestra el espectro en frecuencia de este formato [5 - 7].

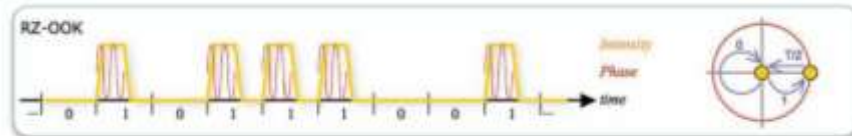


Figura 2.4. Intensidad en el dominio del tiempo y representación de fase de una señal RZ-OOK (50%) [5].

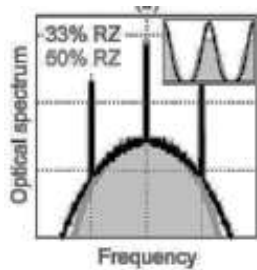


Figura 2.5. Espectro en frecuencia de la señal RZ-OOK para un ciclo útil del 33% y 50% [7].

2.3 Portadora Suprimida Retorno a Cero (CS-RZ)

La principal diferencia entre un formato de modulación CS-RZ y un formato convencional RZ es que la señal óptica CS-RZ tiene un cambio de fase de 180 grados entre los bits adyacentes, debido a la alternancia de fase en el dominio óptico, este formato no presenta componentes continuas de señal eléctrica [9]. Como consecuencia de ello, no hay ningún componente portador de CS-RZ en el espectro. De ahí es donde viene la “supresión de portadora”. En la figura 2.6 se muestra el espectro de frecuencia de la señal CS-RZ.

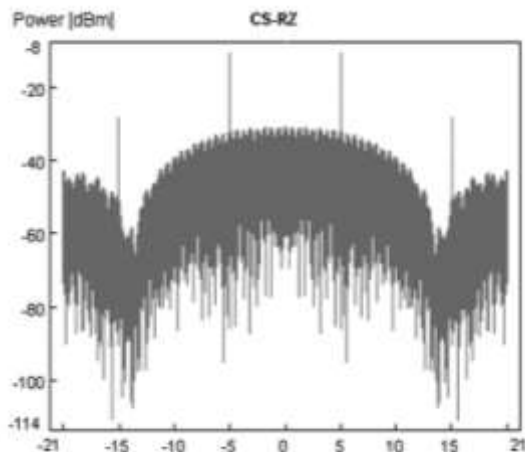


Figura 2.6. Espectro óptico de la señal CS-RZ a 10Gb/s [10].

Una de las limitaciones de esta codificación es que no puede operar en sistemas con espaciado entre canales de 50 GHz y limita su uso a sistemas con espaciado entre canales de 100GHz.

En investigaciones recientes CS-RZ ha demostrado una buena tolerancia a las no linealidades de la fibra y a la dispersión cromática residual, su patrón de intensidad de bits RZ hace que sea fácil encontrar una compensación de dispersión óptica, además, la supresión de portadora reduce el impacto del efecto no lineal de Mezcla de Cuarta Onda (FWM) en sistemas WDM. [10].

2.4 Modulación por Desplazamiento de Fase y Binaria (PSK y BPSK)

En este esquema, cada estado de modulación está dado por la fase que lleva la señal respecto de la original y modifica la fase de la onda óptica (entre 0° y 180° , o 0 y π). En lugar de la intensidad de luz, distribuye la potencia de la señal de forma más uniforme, ya que la potencia está presente en cada intervalo de tiempo (bit), figura 2.7. En teoría eso puede ser presentado como una intensidad de onda continua (CW), ya que los unos y ceros están representados por dos fases diferentes de la onda de luz, la dificultad se presenta en la demodulación, ya que requiere un demodulador que pueda detectar la fase absoluta de la onda de luz recibida. [5, 11, 12].



Figura 2.7. Intensidad en el dominio del tiempo y representación de fase de una señal PSK teórica [5].

2.5 Transmisión de Cambio de Fase Binaria (PSBT)

El ancho de banda teórico requerido para transmitir una señal a una tasa de bits de R símbolos por segundo sin interferencia es $R/2$ Hz. Este formato disminuye el ancho de la señal transmitida a un valor por debajo de este límite mediante la introducción de algo de Interferencia Intersimbólica (ISI - InterSymbol Interference) la cual, posteriormente es eliminada. Sin embargo, todavía transmite 1 bit por símbolo y por lo tanto la velocidad de símbolo es igual a la tasa de bits [13].

PSTB operando a 40Gb/s tiene una gran tolerancia intrínseca a la dispersión cromática, no es necesario un TDC (compensador integrado de dispersión ajustable). Los componentes más importantes para la modulación PSTB son el precodificador y el codificador, los cuales se implementan en el ámbito electrónico y por lo tanto son de bajo costo [14].

2.6 Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase (DPSK)

En este esquema, cada estado de modulación es codificado por un salto de fase respecto a la señal anterior, PSK diferencial consiste en un modulador PSK diferencial impulsado por un flujo de bits. En el esquema diferencial, los ceros representan un cambio de fase de 180° y los unos no representan ningún cambio, así cada vez que se transmite un cero, la fase de la señal se invierte, figura 2.8. Esta técnica ofrece una Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR – Optical Signal to Noise Ratio) superior, pero utiliza más ancho de banda óptico, lo que es aceptable para enlaces de larga distancia (LH) y ultra larga distancia (ULH). Una de las ventajas del método diferencial es la simplicidad en el demodulador, el cual divide la señal en dos, retrasa una de ellas por un periodo de bit usando un camino óptico más largo, y luego los combina dejando que la interferencia constructiva (señales en fase) y la interferencia destructiva (señales con fase opuesta) hagan el trabajo. La salida es una señal similar a NRZ-OOK, modulada en intensidad, la señal en recepción puede pasar a través de un fotodiodo detector para una conversión directa a una señal eléctrica, ya que no es necesario recuperar la portadora de fase coherente [5] [15].

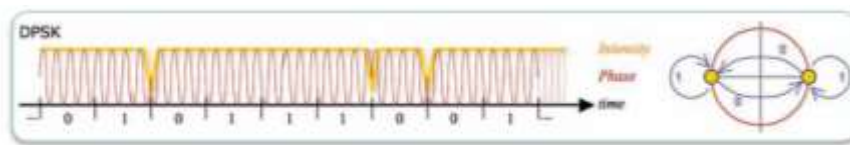


Figure 4. Simplified time domain and phase representations of a theoretical DPSK signal

Figura 2.8. Intensidad en el dominio del tiempo y representación de fase de una señal DPSK [5].

2.7 Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK)

El tren de datos que se van a transmitir se divide en consecutivos pares de bits llamados dibits y se codifica cada bit como un cambio de fase con respecto al elemento de la señal anterior. Esta técnica es más eficiente ya que transmite 2 bits por símbolo y el ancho de banda es $\frac{1}{4}$ de la tasa de bit. Por lo tanto, para este formato de modulación, los efectos de dispersión son considerablemente menores. Las

desventajas son el incremento de la OSNR requerida y el incremento de la complejidad del sistema [11-13].

2.8 Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (DQPSK)

Esta es una buena alternativa, dado que QPSK, transmite 2 bits por símbolo y por lo tanto la velocidad de símbolo es la mitad de la tasa de bit con una complejidad del sistema algo reducida. DQPSK es tolerante a la Dispersión Cromática, Dispersión por Modo de Polarización (PMD – Polarization Mode Dispersion) y tiene una alta eficiencia espectral. Aunque la configuración de un sistema DQPSK es menos compleja en comparación con un sistema QPSK, el gran tamaño y alto consumo de energía de los transceptores ópticos siguen planteando un desafío para los diseñadores. Este formato permite el procesamiento de señales a una velocidad de 40Gb/s en un sistema con separación ente canales de 50Ghz [5, 8]. En la figura 2.9 se muestra el funcionamiento de este formato.

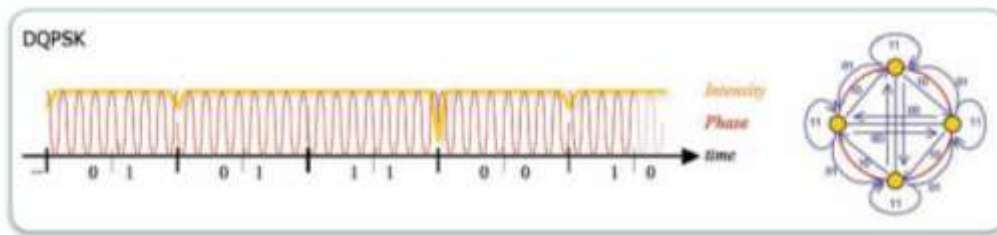


Figura 2.9. Intensidad en el dominio del tiempo y representación de fase de una señal DQPSK [5].

En el caso de los formatos NRZ y RZ, cuando se refiere a ellos implícitamente se hace referencia a los formatos NRZ-OOK y RZ-OOK. De igual manera para los formatos más avanzados se realiza combinaciones de estos con los códigos NRZ o RZ. En la tabla 2.1 se muestra el diagrama de ojo de forma comparativa para los formatos OOK y DPSK combinados con RZ y NRZ para diferentes velocidades de trasmisión.

Tabla 2.1. Medida de la intensidad óptica del diagrama del ojo para NRZ y RZ versión OOK y DPSK para varias tasas de bit [14].

	NRZ	RZ
10 Gb/s – OOK		
40 Gb/s – DPSK		

En las tablas 2.1 y 2.2 se presenta una recopilación de las principales características de los formatos de modulación más utilizados a altas velocidades de transmisión y su robustez frente a los efectos no lineales [15,16].

Tabla 2.2. Características de formatos de modulación a 10Gb/s.

FORMATOS DE MODULACION A 10Gb/s		
Formato de modulación	Sensibilidad a las no linealidades	Complejidad de los costos
Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura QPSK	Muy buena	Altos
Modulación por desplazamiento de fase binario BPSK	Regular	Muy altos

Tabla 2.3. Características de formatos de modulación a 40Gb/s

FORMATOS DE MODULACION A 10Gb/s		
Formato de modulación	Sensibilidad a las no linealidades	Complejidad de los costos
Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura QPSK	Muy buena	Altos
Modulación por desplazamiento de fase binario BPSK	Regular	Muy altos

Referencias

- [1] Gaxiola, Omar Ivan: *Simulador de un Sistema de Comunicación Óptico Empleando Multicanalización por División de Longitudes de Onda (WDM)*. Instituto Politécnico Nacional, Tijuana, B.C., México, 2005.
- [2] Millan, Ramon Jesus: *Estudio y Diseño de Multiplexores por División en Longitud de Onda (WDM) Mediante Efectos Electroópticos, Termoópticos y Acustoópticos*. Universidad de Valladolid, Valladolid, julio de 1998.
- [3] Gómez, Gustavo. Grijalba, Juan Felipe. Toledo, Alejandro: *Análisis de Desempeño de Formatos de Modulación en Comunicaciones Ópticas sobre Redes WDM*. Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones GNTT, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2010.
- [4] Van Den Borne, Dirk: *Robust Optical Transmission Systems Modulation and Equalization*. Universidad técnica de Eindhoven, 2008.
- [5] Polo, Ildelfonso: *Optical Modulation for High Bit Rate Transport Technologies*. Sunrise Telecom, Technology Note. Enzo Drive, San Jose, USA, 2009.
- [6] Binh Le, Nguyen. Csematomy, Zsiofia. *Double-Sideband Carrier Supressed RZ and NRZ Modulation Formats For Ultra-High Capacity 40 Gb/s Optical Communications Systems*. Technical Report, Monash University. Clayton, Australia, 2003.
- [7] Winzer, Peter. Essiambre, Renè-Jean: *Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks*. Journal of Light Wave Technology, Vol. 24, No. 12, pp. 4711-4728, 2006.
- [8] Vassilieva, Olga. *40Gb/s & 100Gb/s Transport in the WAN*. Fujitsu Laboratories of America, Richardson, Texas, 2007.
- [9] Proaño, Julio. Serrano, Xavier: *Estudio Técnico sobre la Implementación de un Sistema de Monitoreo Centralizado para la Red de Fibra Óptica de Etapa*. Universidad Politecnica Sede Cuenca, Cuenca, 2008.
- [10] Zhang, Sen: *Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System*. University of Kansas, 2004.
- [11] Sáenz Peña, Roque: *Teoría de las Telecomunicaciones*. Departamento de Ciencia y Tecnología Universidad Nacional de Quilmes, Buenos Aires, 2009.
- [12] Fitton, Mike: *Principles of Digital Modulation*. Toshiba Research Lab - Toshiba Research Europe Limited.
- [13] Shankar, Hari. Zhao, Lian. Nachum, Ariel: *40G QPSK and DQPSK Modulation*. Inphi Corporation, disponible en: <http://www.inphi.com/technology-overview/40G-QPSK-and-DQPSK-Modulation.pdf>.

[14] StrataLight Communications: *40 Gbps Modulation Schemes Comparison*. Technical Document 3000070-00/Rev3.0

[15] Kaminow, Ivan. Li, Tingye. Willner, Alan: *Optical Fiber Telecommunications*. Academic Press, 2008.

[16] Pincemin, Erwan: *Challenges of 40/100 Gbps deployments in long-haul transport networks on existing fiber and system infrastructure*. France Telecom, Orange Labs, Francia, 2010.