

Análisis comparativo del desempeño de los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK frente a Técnicas de Compensación Ópticas de la Dispersión Cromática en Redes DWDM a 10 Gbps¹

Comparative performance analysis of the modulation formats RZ-DQPSK and RZ-PDPSK facing Optical Compensation Techniques of the Chromatic Dispersion on 10 Gbps DWDM Networks

Análise comparativa do desempenho dos formatos de modulação RZ-DQPSK e RZ-PDPSK em frente às Técnicas de Compensação Ópticas da Dispersão Cromática em Redes DWDM às 10 Gbps

J. D. Herrera, J. T. Toledo, A. Toledo

Recibido: enero 10 de 2017 - Aceptado: enero 15 de 2018

Resumen— En el transporte de información a través de una red basada en fibra óptica se presentan diversas distorsiones de la señal. Una de estas distorsiones es la dispersión cromática que provoca el retardo o ensanchamiento espectral de los pulsos ópticos a medida que se propagan por la fibra, ocasionando un solapamiento con sus adyacentes, por lo cual es necesaria la utilización de técnicas de compensación. El presente artículo analiza las técnicas de compensación ópticas de dispersión cromática en una red DWDM a 10 Gbps, con el fin de proponer la mejor configuración para mitigarla y así consolidar un conocimiento que puede ayudar a los operadores a definir soluciones que den soporte a nuevas exigencias.

Palabras clave — BER, Chromatic Dispersion, DCF, DWDM, efectos lineales, efectos no lineales, factor Q, formatos de modulación.

Abstract—During the transport of information through an optical fiber-based network, various signal distortions can occur. One of these distortions is the chromatic dispersion which generates delays or spectral broadening of the optical pulses as they propagate through the fiber causing an overlap with their adjacent pulses, whereby the use of compensation techniques is necessary. This article analyzes the optical compensation techniques of chromatic dispersion in a DWDM network for 10 Gbps, in order to propose the best configuration for redressal and to consolidate knowledge that can help operators to define solutions to support new requirements.

Keywords—BER, Chromatic Dispersion, DWDM, linear effects, non-linear effects, Q factor, modulation formats.

¹Producto derivado del proyecto de investigación “Análisis comparativo del desempeño de los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK frente a técnicas de compensación ópticas de la dispersión cromática en redes DWDM a 10Gbps”, apoyado por la Universidad del Cauca a través del grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones.

J. D. Herrera, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, email: jherreravar@unicauca.edu.co.

J. T. Toledo, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, email: tatitoledo@unicauca.edu.co.

A. Toledo, Magister Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, email: atoledo@unicauca.edu.co.

Como citar este artículo: Herrera, J. D., Toledo, J. T. y Toledo, A. Análisis comparativo del desempeño de los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK frente a Técnicas de Compensación Ópticas de la Dispersión Cromática en Redes DWDM a 10 Gbps, *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 12, no. 23, pp. 9-15, enero-junio, 2018.

DOI: <http://dx.doi.org/10.31908/19098367.3697>



Resumo—No transporte da informação através de uma rede baseada em fibra óptica apresentam-se diversas distorções do sinal. Uma destas distorções é a dispersão cromática, a qual provoca o retardo ou alargamento espectral dos pulsos ópticos durante a sua propagação pela fibra. A dispersão cromática gera uma sobreposição entre pulsos adjacentes, assim, se faz necessária a utilização de técnicas de compensação. Este artigo analisa as técnicas de compensação ópticas de dispersão cromática numa rede DWDM a 10 Gbps, com o objetivo de propor a melhor configuração para a sua mitigação. Além disso, o artigo consolida o conhecimento para ajudar aos operadores na definição de soluções que suportem as novas exigências.

Palavras chave— BER, Dispersão Cromática, DCF, DWDM, efeitos lineares, efeitos não-lineares, fator Q, formatos de modulação.

I. INTRODUCCIÓN

Las redes de Multiplexación por División en longitudes de Onda Densas (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*) surgen como respuesta a la necesidad de brindar mayor capacidad de transmisión a largas distancias, sin embargo, presentan dificultades para responder a las distorsiones en la transmisión [1] [2]. Debido a esto, cobran importancia las técnicas de compensación óptica, las cuales se basan en el módulo compensador de dispersión (DCM, *Dispersion Compensation Module*), que gracias a sus propiedades contribuye a disminuir las distorsiones causadas por la Dispersión Cromática (CD, *Chromatic Dispersion*) [3]. El análisis del efecto de la CD y su compensación a través de DCM se hizo concretamente para dos formatos de modulación: Retorno a cero - Modulación por desplazamiento por cuadratura diferencial de fase (RZ-DQPSK, *Return to Zero -Differential Quadrature Phase Shift Keying*) y Retorno a cero - Modulación por desplazamiento diferencial de fase parcial (RZ-PDPSK, *Return to Zero - Partial Differential Phase Shift Keying*) en redes DWDM a 10 Gbps.

Finalmente, el objetivo de esta investigación es el de realizar un análisis comparativo de la tolerancia de los dos formatos de modulación frente a la compensación de la CD, utilizando DCM y Amplificadores de Fibra dopada con Erblio (EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifier*).

II. DESARROLLO DEL ARTÍCULO

Los DCM están compuestos de Fibra de Bragg Grating (FBG, *Fiber Bragg Grating*) o Fibra Compensadora de Dispersión (DCF, *Dispersion Compensating Fiber*) para compensar dispersión de tercer y segundo orden, respectivamente [3].

La característica principal de la DCF es la de tener un coeficiente de dispersión elevado y de signo contrario a la que ha introducido la fibra principal, por esto, es suficiente con introducir a lo largo de la red pequeños tramos para compensar la CD acumulada hasta que la dispersión residual sea prácticamente nula [4]; además, trabaja a bajas potencias e introduce altas pérdidas, lo cual hace necesario el uso de amplificadores ópticos [3]. Cabe resaltar que es de vital importancia calcular la cantidad de DCF necesaria para compensar un enlace, debido a que un exceso o falta de esta, puede causar degradaciones por el aumento de los efectos no lineales [5] [6] [7].

Dado que a una velocidad de transmisión de 10 Gbps (correspondiente a un periodo de bit: $T_b=100$ ps) se presenta mayormente una dispersión de segundo orden, ya que los efectos dispersivos de orden mayor son mínimos [8], solo se realiza el análisis de la tolerancia de los formatos de modulación utilizando DCF.

Existen tres técnicas para la utilización de la DCF: Post-compensación, pre-compensación y compensación simétrica. La técnica de post-compensación óptica se basa en ubicar tramos de DCF después de la fibra principal, para que la CD acumulada sea compensada al final de cada tramo; en pre-compensación se colocan tramos de DCF antes de la fibra principal, causando una compresión de los pulsos y

una baja del nivel de potencia de la señal, acumulando CD negativa al inicio de la red debido a las propiedades de la DCF, y después se incrementa de forma positiva debido a la fibra principal [5]; mientras que la compensación simétrica se basa en ubicar la DCF antes y después del tramo principal de fibra [6] [7].

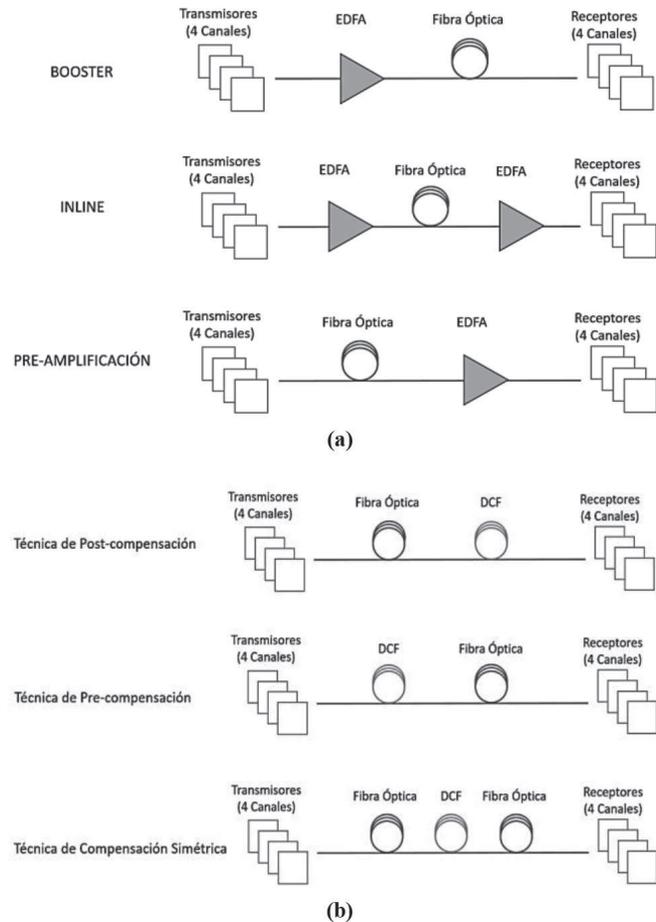


Fig. 1. Modelo de red: (a) Configuración del amplificador. (b) Técnica de compensación.

Además, existen tres configuraciones para los amplificadores: Booster, en la cual el EDFA se sitúa a continuación de una fuente óptica y antes de la fibra principal; Inline, que sitúa el amplificador entre los span de fibra óptica; y pre-amplificación, en la que EDFA se ubica inmediatamente antes del receptor [9].

Con el fin de analizar el efecto de la DCF en redes DWDM a 10 Gbps, se construyó un modelo de red, en el cual se midieron algunos parámetros que brindan información acerca de la calidad del enlace, para así estimar y analizar el desempeño de la red con respecto a los formatos de modulación implementados, y su tolerancia frente a la CD.

En la Fig. 1. se visualiza el modelo de red, para el cual se tuvieron en cuenta las técnicas de compensación ópticas y la configuración del amplificador; además, se encuentra regido por las recomendaciones UIT-T [10] [11] [12] y diferentes características y parámetros expuestos en la tabla I [3] [9] [13].

TABLA I
CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETROS DEL MODELO DE RED

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
PARÁMETRO	VALORES
Topología de Red	Punto a Punto
Velocidad del sistema	10 Gbps
Tecnología de Red	DWDM unidireccional
Banda de operación	Banda C (1530 - 1560nm)
Ventana	Alrededor de 1550 nm
Número de canales	4 canales
Espaciamiento entre canales	25, 50 y 100 GHz
Equipos de amplificación	EDFA
Técnica de compensación	DCF
CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR	
Formatos de modulación	RZ-PDPSK y RZ-DQPSK
Tipo de modulación	Externa con Mach-Zehnder
Potencia del Tx del láser	0 a 6 dBm
Tipo de laser	Laser de onda continua
CARACTERÍSTICAS DE LA FIBRA ÓPTICA Corning SMF-28e+	
Coefficiente de dispersión	8 y 17 ps/nm * Km
Coefficiente de atenuación	0,275 dB/Km
CARACTERÍSTICAS DE LA DCF	
Técnica de compensación	Pre-compensación
	Post-compensación
	Compensación simétrica
Coefficiente de dispersión	-100 ps/nm * Km
Atenuación	0,55 dB/Km
CARACTERÍSTICAS DEL RECEPTOR	
Sensibilidad del Rx	-30 dBm
BER y Factor Q	10^{-12} y 16.94 dB

III. EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN DE LA DISPERSIÓN CROMÁTICA EN REDES DWDM

Para evaluar el efecto de las técnicas de compensación de la CD, se utiliza la herramienta de simulación OptSim de SYNOPSIS [14] que proporciona una interfaz flexible para el diseño, análisis y evaluación del desempeño de redes ópticas que ofrece visualización de datos, mediante métodos de análisis numéricos en el dominio del tiempo y la frecuencia (Time Domain Split Step, Frequency Domain Split Step) [15]; además, para la ejecución de la simulación se estableció el método de análisis en el dominio de la frecuencia, el número de muestras en 128 y el tiempo de simulación se fijó en 70 ns.

En esta herramienta se creó un escenario general de simulación en el cual se establecieron dos configuraciones: una para el formato de modulación RZ-DQPSK y otra para el formato RZ-PDPSK, como se visualiza en la Fig. 2. y Fig. 3, respectivamente.

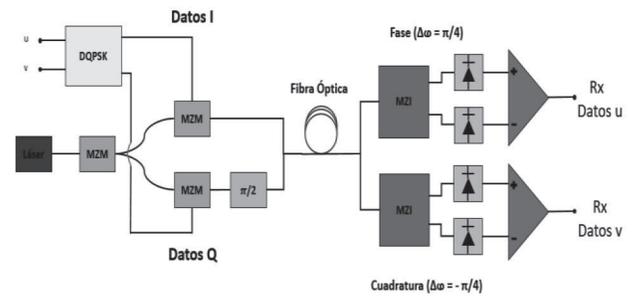


Fig. 2. Configuración para el formato de modulación RZ-DQPSK.

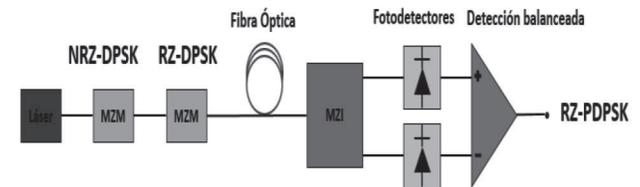


Fig. 3. Configuración para el formato de modulación RZ-PDPSK.

Cabe resaltar que RZ-PDPSK tiene un retraso menor al T_b , por lo tanto, se escoge un retraso de 65 ps correspondiente a un Rango Espectral Libre (FSR, Free Spectral Range) de 15.3 GHz; este valor es concluyente en algunos estudios por su buen rendimiento y mayor robustez, además, no necesita de fuerte filtrado óptico y presenta un menor ancho de banda comparado con un retardo menor [16] [17] [18] [19] [20].

Para las dos configuraciones se realiza la simulación y análisis de resultados abordando el efecto de la CD, su compensación con DCF, máxima distancia alcanzable y el desempeño de la red mediante parámetros de monitoreo óptico, tales como: Tasa de Error de Bits (BER, Bit Error Rate) y Factor Q, que según la recomendación UIT-T Serie G Suplemento 39, sugiere una BER= 10^{-12} y un factor $Q \approx 7.03$ ($Q \approx 16.9$ dB) [21].

Inicialmente, dichos parámetros se tuvieron en cuenta para diseñar una red, eligiéndola como una red básica sin compensación para verificar los efectos que tienen las técnicas de compensación ópticas sobre esta.

La red básica permitió escoger un valor máximo de longitud de fibra SMF-28e+, sin la implementación de técnicas de compensación cumpliendo los parámetros de desempeño; es preciso resaltar que, según la tolerancia del formato de modulación, se obtuvieron diferentes valores de longitud. Esta longitud es importante debido a la necesidad de alcanzar mayores distancias, haciendo necesaria la implementación de técnicas de compensación, las cuales introducen una mayor atenuación incurriendo en posibles caídas de la red, por lo que se realizó un análisis teniendo en cuenta el peor caso posible cumpliendo con los parámetros de desempeño, para proporcionar un buen comportamiento de la red.

Posteriormente, se realiza una evaluación de los parámetros de desempeño variando el porcentaje de compensación de la CD bajo los regímenes de dispersión normal (compensación menor al 100% de la CD) y cero (compensación igual al 100% de la CD); además, se varía

la configuración de los amplificadores entre Booster, inline y pre-amplificación, sobre las técnicas (pre-compensación, post-compensación y compensación simétrica) para definir cuál presenta un mejor desempeño sobre los formatos RZ-DQPSK y RZ-PDPSK, considerando solo el efecto de la CD y la atenuación, así como todos los efectos de la fibra; características que fueron posibles de variar a través de la herramienta de simulación Optsim en el módulo de propiedades de la fibra, que permite activar o desactivar los efectos que influyen en esta (pestaña de control avanzado).

Entonces, para solo tener en cuenta los efectos de CD y atenuación, es necesario ignorar los efectos no lineales y de Dispersión por Modo de Polarización (PMD, Polarization Mode Dispersion), como se visualiza en la Fig.4, en la que se muestran los parámetros Fiber Non-Linearity, Raman Crosstalk y Fiber PMD en "Off".

Parameter	Value
Fiber Non-Linearity	"Off" ▼
Raman Crosstalk	"Off" ▼
Fiber PMD	"Off" ▼
Fiber Birefringence	"On" ▼
Polarization original frame recovering	"On" ▼

Fig. 4. Parámetros de control avanzado de las fibras.

También, los parámetros Fiber Birefringence y Polarization original frame recovering se dejaron en "On", ya que las fibras ópticas son birrefringentes, ya que hay factores internos y externos que generan asimetrías en los índices de refracción del revestimiento y el núcleo.

La birrefringencia es muy útil en los dispositivos ópticos porque representa la división del haz de luz no polarizado que entra a un medio anisotrópico [22] en dos haces linealmente polarizados; uno de ellos se comporta de acuerdo con la ley de Snell llamada Rayo ordinario, mientras que el otro no lo hace y se denomina Rayo extraordinario. Ambas ondas se propagan con diferente velocidad y se caracterizan por diferentes índices de refracción [23].

El segundo parámetro se refiere a la recuperación de la polarización inicial; este interruptor activa o desactiva la rotación de la polarización inducida por la birrefringencia; si se encuentra en "On" significa que al final de la sección de fibra se hace girar para recuperar toda la rotación inducida por la birrefringencia durante la propagación. Por consiguiente, si esta función se usa cuando los otros fenómenos relacionados con la polarización (no linealidad y PMD) se desactivan, la polarización del campo óptico de salida es exactamente el mismo que el campo óptico de entrada [24].

Después se analizó el impacto que causa la CD junto a otros efectos de la fibra en la red; debido a ello se activaron los efectos no lineales y de PMD y, por lo tanto, se cambiaron los parámetros Fiber Non-Linearity, Raman Crosstalk y Fiber PMD de "off" a "On".

También, se realizó un análisis con aspectos más

reales en un enlace de comunicaciones, es decir, un enlace que implementaba varios span, sobre la mejor técnica de compensación ya definida, con el fin de obtener una máxima distancia para cada formato de modulación con resultados más reales comparados con un escenario a grandes distancias (red DWDM). Finalmente, se varió la separación entre canales para poder definir si considerando todos los aspectos, bajo el escenario propuesto, el enlace puede soportar una separación de canales menor a 100 GHz, que es la definida por la recomendación ITU-T G694.1 para una red DWDM a 10 Gbps.

Es de resaltar que a medida que se analizaron los diferentes casos de estudio de la tolerancia de los formatos de modulación frente a la CD y el desempeño de estos frente a las técnicas de compensación, también se variaron diferentes parámetros como: longitud de las fibras (SMF-28e+ y DCF), coeficiente de dispersión, potencia de transmisión, espaciado entre canales, ganancia de los EDFA, entre otros.

A continuación, en la tabla II, se presenta una comparación de los resultados obtenidos mediante el análisis de los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK sobre las diferentes configuraciones evaluadas, en los cuales, se determinaron algunos factores que inciden significativamente en el desempeño de los formatos de modulación y su comportamiento frente a las técnicas de compensación ópticas, resumiendo el comportamiento de la red sobre los formatos a una velocidad de transmisión de 10 Gbps, a medida que se variaron los parámetros frente a las técnicas de compensación ópticas de la CD.

Después de realizar el análisis de las técnicas de compensación ópticas de la CD, para los formatos de modulación RZ-DQPSK y RZ-PDPSK con velocidad de transmisión de 10 Gbps, se determinó:

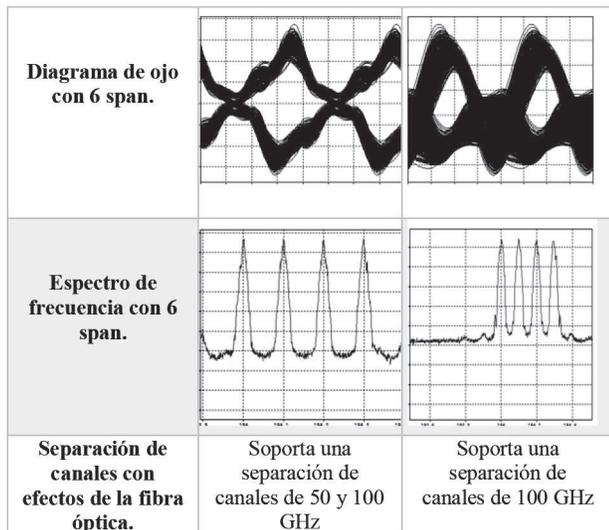
- El formato de modulación RZ-DQPSK alcanza mayores distancias de enlace comparado con RZ-PDPSK, cuando la longitud solo se encuentra afectada por la dispersión y la atenuación, por lo tanto, el formato RZ-DQPSK tiene mayor tolerancia a los efectos de la dispersión cromática.
- El formato RZ-PDPSK es poco tolerante a la dispersión cromática, siendo esta una de las distorsiones de la señal que más afecta el desempeño del formato, por lo cual es necesario tener especial cuidado con la misma.
- La mejor técnica de compensación para el formato RZ-DQPSK fue post-compensación con configuración del amplificador en Booster, definida sobre un escenario de simulación con todos los efectos de la fibra, implementando varios span.
- La mejor técnica de compensación para el formato RZ-PDPSK fue post-compensación con configuración Booster, definida sobre un escenario de simulación con todos los efectos de la fibra óptica, implementando un solo span.
- El formato de modulación RZ-DQPSK, implementa menos porcentaje de compensación para alcanzar una longitud de SMF-28e+ cuando no se limita en potencia, en comparación con RZ-PDPSK cumpliendo los parámetros mínimos de desempeño.

- El formato de modulación RZ-DQPSK soporta mayores distancias que RZ-PDPSK pero se limita en potencia, dado que lo afecta en mayor medida la amplificación y el ruido introducido por los EDFA.
- La no implementación de DCF en el enlace limita la distancia máxima alcanzable, la cual se encuentra en el orden de los 70 y 150 Km para RZ-DQPSK y RZ-PDPSK respectivamente, comparado con distancias de hasta 300 Km cuando se implementan varios span.
- Se comprobó que el formato RZ-DQPSK soporta una separación de canales de 50 GHz, la cual es menor a la definida por la recomendación, mientras que el formato RZ-PDPSK solo soporta una separación mínima de canales de 100 GHz, con los parámetros de simulación definidos.
- El formato RZ-DQPSK es más eficiente espectralmente comparado con RZ-PDPSK, pero al implementar una separación de canales de 50 GHz es necesario aumentar el porcentaje de compensación, para contrarrestar en mayor medida la CD dado que los pulsos se encuentran más cerca.

TABLA II
ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE LOS FORMATOS DE MODULACIÓN RZ-DQPSK Y RZ-PDPSK EN UNA RED DWDM A 10 GBPS, FRENTE A LAS TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS DE LA CD

Técnica de formación de pulsos	RZ	
	DQPSK	PDPSK
Modulación		
Diagrama de ojo back-to-back		
Espectro de frecuencia back-to-back		
Longitud máxima con efectos de CD y atenuación, sobre un enlace con fibra Corning SMF-28e+	Enlace de 140 Km, con BER=1x10 ⁻¹² y factor Q=16.99 dB	Enlace de 70 Km, con BER=1x10 ⁻¹³ y factor Q=17.41 dB

Separación de canales con efectos de CD y atenuación.	Soporta una separación de canales de 50 y 100 GHz	Soporta una separación de canales de 50 y 100 GHz
Mejor configuración de amplificación con efectos de CD y atenuación.	EDFA en configuración Booster.	No se define, dado que no es necesaria la implementación de amplificadores.
Longitud máxima con todos los efectos de la fibra Corning SMF-28e+, sin implementar técnicas de compensación.	Enlace de 158 Km, con BER=1.98x10 ⁻¹⁷ y factor Q=19.05 dB	Enlace de 74 Km, con BER=9.48x10 ⁻¹³ y factor Q=17.06 dB
Mejor técnica de compensación con todos los efectos de la fibra, sin tener en cuenta las limitaciones de potencia de recepción.	Con la técnica de compensación simétrica se obtuvo un mejor desempeño (sin implementación de amplificadores).	Con la técnica de post-compensación se obtuvo un mejor desempeño (sin implementación de amplificadores).
Mejor técnica de compensación en configuración de amplificación y todos los efectos de la fibra.	La mejor técnica en configuración Booster, está definida por el nivel de compensación (porcentaje de compensación).	La técnica de post-compensación en configuración de amplificación Booster, presenta mejores resultados.
Longitud máxima con todos los efectos de la fibra e implementando varios span.	6 span: 294 Km 5 span: 270 Km 4 span: 244 Km 3 span: 216 Km 2 span: 196 Km con parámetros de desempeño objetivos (BER=1x10 ⁻¹² y factor Q=16.94 dB)	6 span: 300 Km 5 span: 265 Km 4 span: 236 Km 3 span: 210 Km 2 span: 182 Km con parámetros de desempeño objetivos (BER=1x10 ⁻¹² y factor Q=16.94 dB)
Mejor técnica de compensación en configuración del amplificador, efectos lineales y no lineales, para varios span.	La técnica de post-compensación Booster, presenta mejores resultados.	La técnica de post-compensación en configuración de amplificador en Booster, definida para un solo span.



IV. CONCLUSIÓN

Mediante la caracterización de los formatos de modulación, se realizó un análisis comparativo de la implementación de estos en un modelo simplificado de red DWDM a 10 Gbps, determinando que RZ-DQPSK aporta la mejor solución en cuanto a la relación costo-eficiencia, para ser implementado en redes de fibra óptica.

A partir del análisis de los resultados obtenidos, se comprobó que la CD es el efecto que más incide en el desempeño de los formatos estudiados, la cual se incrementa a medida que aumenta la longitud de fibra principal, limitando la distancia del enlace. Además, se pudo determinar que realizar compensación de la CD, es fundamental para mejorar el desempeño de los formatos.

Con los resultados obtenidos mediante la herramienta OptSim, se comprobó que el formato de modulación RZ-DQPSK, presenta un mejor desempeño en una red DWDM a 10 Gbps, respecto a los parámetros de BER y factor Q que el formato RZ-PDPSK, debido a que presenta un mejor comportamiento ante la CD.

Por medio del análisis comparativo se determinó que la técnica de post-compensación en configuración Booster, presenta el mejor desempeño para los formatos de modulación estudiados. Además, se comprobó que la CD se debe compensar hasta cierto límite, ya que no es recomendable eliminarla totalmente de la red óptica, debido a su implicación sobre otros efectos de la fibra.

REFERENCIAS

- [1] Moreno, P. «Formatos de Modulación Avanzados para Sistemas de Comunicaciones Ópticas Coherentes,» Tesis fin de carrera, Universidad Sevilla, 2011.
- [2] Van de Borne, V. Robust Optical Transmission Systems, Eindhoven: Proefschrift, DOI: 10.6100/IR633535, 2008.
- [3] Melo, D. F., Ruiz, J. A. y Toledo, A. «Análisis de Desempeño de Diferentes Técnicas de Compensación Ópticas y Electrónicas para la CD en Redes WDM.» Revista Entre Ciencia e Ingeniería, Vol 6 No. 11, pp. 101-130, 2012.
- [4] Sangucho Morocho, C. E, Morocho, W. B. «Diseño de la Red de Backhaul para una Nueva Salida de Cable Submarino, utilizando la fibra Óptica del Oleoducto de Crudos Pesados a Disposición del Estado Ecuatoriano,» Tesis fin de carrera, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2009.

- [5] Ruiz, J. A., Melo, D. F. y Toledo, A. «Análisis de Desempeño de redes WDM Comerciales con Técnicas de Compensación Ópticas y Electrónicas para la Dispersión Cromática,» Primer Seminario Taller Latinoamericano de Instrumentación, Control y Telecomunicaciones SICOTEL 2012, Armenia, Quindío, 2012.
- [6] Arora, O., Kumar Garg, A. and Punia, S. Symmetrical Dispersion Compensation For High Speed Optical Links, IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 8, Issue 6, No 1, pp. 371-376, 2011.
- [7] Singh, R., Kumar, L. and Malhotra, N. «Dispersion compensation in Optical Fiber communication for 40 Gbps using dispersion compensating Fiber.» International Journal for Science and Emerging Technologies with Latest Trends” 19(1): 19-22, 2015.
- [8] Gómez, S. M. «Control de la dispersión cromática en guías ranuradas nanofotónicas,» Tesis de master, Universidad Politécnica de Valencia, 2010.
- [9] Muñoz. N. C. G.A. «Análisis Comparativo en el Desempeño de una Red DWDM a 10 Gbps al Usar Configuraciones Raman con Fibras DCF,» Popayán, 2016.
- [10] ITU: International Telecommunication Union. I.-T. R. G.652. «Characteristics of a single-mode optical fibre and cable,» Noviembre, 2009.
- [11] ITU: International Telecommunication Union, U.-T. R. G.691, «Interfaces ópticas para los sistemas monocanal STM-64 y otros sistemas de la jerarquía digital síncrona con amplificadores óptico,» Marzo, 2006.
- [12] ITU: International Telecommunication Union, I.-T. R. G.694, «Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid,» Febrero, 2012.
- [13] Gómez, G., Grijalba, J. F. «Análisis del Desempeño de Formatos de Modulación en Comunicaciones Ópticas sobre Redes WDM,» Universidad del Cauca, Popayán, 2010.
- [14] Rsoft Optsim, «Simulador de redes ópticas Optsim de Rsoft,» [En línea]. Available: <https://www.synopsys.com/optical-solutions/rsoft/system-network-optim.html>.
- [15] Synopsys Rsoft Solutions, «Rsoft Product Catalog» [En línea]. Available: <https://www.synopsys.com/content/dam/synopsys/optical/pdf/RSoft-Product-Catalog.pdf>. [Último acceso: 13 Febrero 2018].
- [16] Murray, N. J., Olubodun, O. A., Harper, P., Doran, N. J. «Performance enhancement of partial-42.7 Gb/s DPSK via an asymmetrical receiver design» 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) DOI: 10.1109/ICTON.2013.6602999, Cartagena, Spain, 2013.
- [17] Richards, D., Kota Pavan, S., Patel, J., Ghillino, E. «Improved Tolerance to the Combined Effect of In-Band Crosstalk and Chromatic Dispersion in Partial DPSK Systems» 15th IEEE International Workshop on Computer Aided Modeling, Analysis and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), Miami, FL, USA, 2010.
- [18] Farooq, E., Kumar, S., Sahu, N. «BER analysis of OOK and DPSK schemes in gamma-gamma turbulence channel with PIN and APD photodetector» 8th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), IEEE, DOI: 10.1109/ICCCNT.2017.8203986, Delhi, India, 2017.
- [19] Moreno, P., Govan, D. S., Doran, N. J. «Experimental verification of the dispersion tolerance improvement of partial DPSK with optimised filtering, 35th European Conference on Optical Communication, Vienna, Austria, 2009.
- [20] Zhang, Q., Huang, C., Rahman, A. «Performance Optimization for 44 Gb/s Return-to-Zero Partial DPSK Transceiver with Pre-Emphasized Electrical Signal Driving Path,» DOI: 10.1109/ICCCNT.2012.6356886, 1st IEEE International Conference on Communications in China (ICCC), Beijing, China, 2012.
- [21] UIT-T Serie G Suplemento 39, «Consideraciones sobre el diseño e ingeniería de sistemas ópticos,» 2006.
- [22] Universidad de Vigo, Departamento de Física Aplicada, «Polarización de la luz. Birrefringencia. Efectos ópticos inducidos,» 2010.
- [23] Heredia, G. N. «Caracterización de Birrefringencia con Sistemas Láser de Fibra Óptica en Anillo,» Mexico, 2011.
- [24] Rsoft Design Group, Inc, «OptSim Models Reference». http://www.academia.edu/8043888/OptSim_Models_Reference_Volume_I_Sample_Mode.



Jennifer Tatiana Toledo Noguera nació en Popayán, Colombia, el 30 de abril de 1991. Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones, 2016 de la Universidad del Cauca. Áreas de interés: Sistemas de Comunicaciones por Fibra Óptica, Gestión de Redes de Telecomunicaciones, Redes de Nueva Generación.



Juan David Herrera Varona nació en Pereira, Colombia, el 18 de noviembre de 1988. Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, 2016 de la Universidad del Cauca. Áreas de interés: Networking, Ingeniería de Redes, Calidad del Servicio en Redes de Telecomunicaciones, Sistemas de Comunicaciones por Fibra Óptica, Redes de comunicaciones ópticas avanzadas.



Alejandro Toledo Tovar nació en Florencia, Colombia, el 22 de mayo de 1975. Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, 2000; Especialista en Redes y Servicios Telemáticos, 2002 y Magister en Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, 2014 de la Universidad del Cauca. Docente Titular de Tiempo Completo de la Universidad del Cauca, adscrito al Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca - Colombia, desde el Año 2000; investigador del Grupo de I+D en Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT) adscrito a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Cauca. Áreas de Interés: Calidad de Servicio en Redes IP, Gestión Integrada de Redes y Servicios de Telecomunicaciones y Comunicaciones ópticas.