

Análisis comparativo a nivel de eficiencia espectral en redes DWDM a 40 Gb/s entre detección directa y detección coherente*

Comparative analysis at the level of spectral efficiency in a 40 Gb/s DWDM networks between direct detection and coherent detection

Édgar Rodrigo Enríquez Rosero¹
José Giovanni López Perafán²
Universidad del Cauca, Colombia

RESUMEN

El presente artículo describe el diseño de un sistema DWDM a la velocidad de 40 Gb/s y posteriormente muestra los resultados comparativos obtenidos mediante simulación a nivel de recepción entre el uso de la detección directa o incoherente y la detección coherente, teniendo en cuenta los parámetros de potencia, sensibilidad del receptor, distancia, coeficiente de dispersión y la forma de contrarrestar los efectos no lineales como SPM y CD en cada trayecto o span que conforman el canal de comunicación evaluado en fibras *DC Anomalous* y *Allwave*, determinando entre las dos formas de detección la que presente un mejor desempeño a nivel de BER y Factor Q.

Palabras clave: Multiplexación compacta por división de longitudes de onda, Detección coherente, Eficiencia espectral, Comunicaciones en fibra óptica.

ABSTRACT

This paper describes the design of a DWDM system the speed of 40 Gb/s and subsequently presents the comparative results obtained through simulation between the reception level using direct detection or incoherent and coherent detection, taking into account parameters power, receiver sensitivity, distance, scattering coefficient and how to counter non-linear effects such as SPM and CD in each path comprising the span or communication channel fibers DC evaluated Allwave Anomalous and determining between the two forms of detection which present a better performance in terms of BER and Q factor.

Key words: Dense wavelength division multiplexing, Coherent detection, Spectral efficiency, Optical communications fiber.

* Artículo resultado de investigación: Análisis de la eficiencia espectral para redes DWDM a 40 Gbps utilizando técnicas de detección coherente. Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones – GNTT. Línea de investigación: Señales y Sistemas de Telecomunicaciones. Investigador principal: Édgar Rodrigo Enríquez Rosero.

1. Ingeniero de Sistemas, Especialista en Alta Gerencia. Especialista en Redes y Servicios Telemáticos. Msc(c) Electrónica y Telecomunicaciones en la Universidad del Cauca. Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones – GNTT. Línea de investigación: Señales y Sistemas de Telecomunicaciones. edgarenriquez@unicauca.edu.co

2. Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones, Universidad del Cauca. Esp. Msc. Telemática. PhD. Ciencias de la Electrónica. Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT. Línea de investigación: Señales y Sistemas de Telecomunicaciones. glopez@unicauca.edu.co

Fecha de recepción: 26 de noviembre de 2015 • Fecha de aceptación: 15 de diciembre de 2015

INGENIARE, Universidad Libre-Barranquilla, Año 11, No. 19, pp. 11-24 • ISSN: 1909-2458

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los desafíos existentes a nivel de transmisión de una señal óptica sobre fibra a altas velocidades de transmisión de datos, es la tolerancia a los efectos de la degradación lineal y/o no lineal que surgen cuando se incrementa la potencia de entrada [1, 2], al igual que diferentes retos adicionales a los cuales se enfrentan los diseñadores de sistemas de telecomunicaciones ópticas, teniendo en cuenta los requerimientos y avances en interconectividad de acuerdo a la demanda actual de servicios por parte de los usuarios.

Considerando estos antecedentes, se planteó el análisis de dos técnicas de detección a nivel de telecomunicaciones ópticas: la detección directa o incoherente y la detección coherente, tecnologías que se aplican a los sistemas actuales y cuyo objetivo en la investigación desarrollada fue hacer un análisis comparativo entre las dos tecnologías para conocer su desempeño a nivel de eficiencia espectral.

Dado que el sistema requiere establecer algunos elementos que garanticen una transmisión adecuada, es decir, una serie de condiciones bajo las cuales se asegure el correcto envío de datos en el sistema propuesto, en el artículo se discute el diseño del sistema basado en la tecnología *Dense Wavelength Division Multiplexing – DWDM*, haciendo énfasis en el canal de comunicación, tomando como referentes las fibras *DC Anomalous* y *Allwave*, al igual que la utilización de las rejillas compensadoras (*Grids*) para mitigar los efectos no lineales presentes como son *Self Phase Modulation – SPM* y *Chromatic Dispersion – CD*. Por último, se dan a conocer los resultados de la investigación y se presentan los análisis respectivos una vez culminado el proceso de simulación desarrollado, aportando un conocimiento en el área de los servicios y arquitecturas de telecomunicaciones ópticas.

2. METODOLOGÍA

Para el diseño de un sistema DWDM a una velocidad de 40 Gbps, en el cual se busca evaluar el desempeño de una red [3] DWDM a través de la medida de la eficiencia espectral, se aplicó una metodología de simulación para llevar a cabo la abstracción del modelo simplificado de red e implementarlo en un simulador, generando diversos escenarios utilizando técnicas de detección coherente a ser comparadas con la detección directa. La metodología seleccionada presenta similitudes con la utilizada para el desarrollo y construcción de software a nivel de prototipos o de aplicaciones reales, razón por la cual se tuvo en cuenta una de las metodologías propuestas por [4, 5], aplicando las etapas de formulación del problema, especificación de las características y elección del modo de operación de la herramienta de simulación Optsim®, generación y definición de las características del escenario de simulación para culminar con el plan de evaluación y pruebas.

Etapa 1. Formulación del problema

En esta etapa se definió el problema relacionado con los inconvenientes en transmisión a altas velocidades que generan los efectos lineales y no lineales en sistemas DWDM y si es posible lograr

una recepción adecuada a través de los métodos de detección directa y coherente, siendo necesario realizar un análisis comparativo de la eficiencia espectral de una red DWDM implementando técnicas de detección coherente y directa, frente a variaciones en los parámetros de transmisión, teniendo en cuenta el análisis de los efectos no lineales, por ser los que causan degradaciones significativas en las redes DWDM [6]. Similarmente se definió la técnica de detección coherente a implementar en el modelo de simulación, al igual que los principales parámetros de transmisión de una red DWDM [7] y por último, se consideran aquellos elementos que conforman el monitoreo óptico para determinar el desempeño [8, 9] de una red DWDM al emplear detección coherente y directa.

Etapas 2. Especificación de las características y elección del modo de operación de la herramienta de simulación Optsim®

Para esta etapa, se utilizó el simulador Optsim® de *Optical Solutions* para representar un sistema de comunicaciones ópticas como una interconexión de bloques y/o elementos, donde cada bloque puede ser un componente o un subsistema. La señal se pasa de componente a componente y cada bloque puede simularse de manera independiente implementando una metodología de simulación orientada a bloques. El documento [10] define dos modos de simulación en los cuales opera: *Simulación modo bloque*, donde la señal de datos pasa entre componentes representando todo el tiempo de simulación en un bloque de datos, en este enfoque los modelos de los componentes y algoritmos pueden trabajar fácilmente con toda la señal, transformándola entre el dominio del tiempo y de la frecuencia para operar los datos en el dominio más conveniente para el algoritmo de simulación, mientras que en la *simulación modo muestra*, la señal de datos que pasa entre componentes representa una muestra única o un paso de tiempo a la vez y el procesamiento de la señal, en este modo, se realiza completamente en el dominio del tiempo y elegido para la simulación propuesta.

En esta etapa se implementó el modelo simplificado de red en un escenario de simulación para evaluar el desempeño de una red DWDM frente a variaciones en los parámetros de transmisión y el impacto de estas variaciones en los efectos no lineales [8, 11].

Etapas 3. Generación y definición de características del escenario de simulación

La generación del escenario de simulación tiene como punto de partida el análisis de los principales parámetros de transmisión en una red DWDM y el impacto de las variaciones de estos en los efectos no lineales y, por ende, en el desempeño de la red. El análisis del comportamiento de los efectos no lineales requiere del esquema del escenario de simulación en la Figura 1, que contiene diferentes configuraciones, definiendo y parametrizando los objetos para cada subsistema: Transmisor, Canal y Receptor.

En el esquema general se fijaron algunos posibles parámetros a trabajar dentro de la simulación, sin embargo dadas algunas condiciones iniciales, se tiene como parámetro fijo la velocidad en el transmisor, la codificación de línea y el esquema de modulación, de igual manera se procede a definir aquellos objetos que hacen parte de cada subsistema aplicando la filosofía de la Programación Orientada a Ob-

jetos (POO) y la idea de aplicarla se debe a que Optsim, utiliza esta práctica para definir sus objetos, a quienes llama luego clases y cuyo comportamiento se basa en esta forma de programación, en la cual cada objeto representa un elemento que tiene unas propiedades o atributos y una serie de métodos que permiten manejar o manipular los parámetros para ser entregados a otros objetos en forma de mensajes o para obtener algunos resultados dentro del mismo objeto.

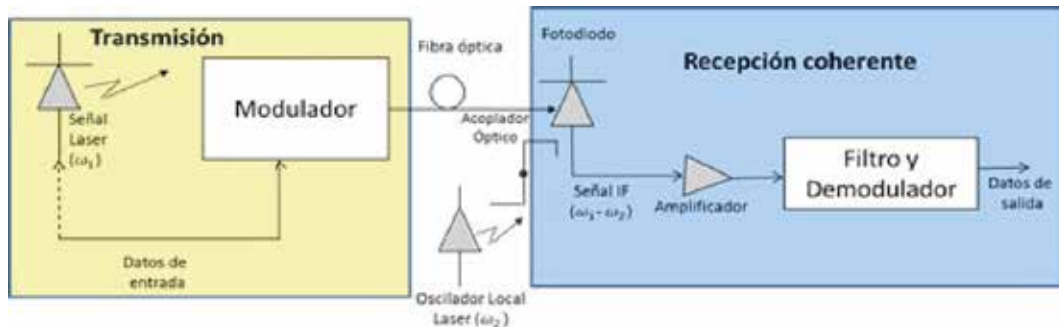


Figura 1. Esquema general del sistema a simular

Fuente: Elaboración de los autores

Transmisión

La etapa de transmisión consta de 16 canales y cada canal varía en frecuencia para generar el espaciado entre canales equivalente a 50 MHz, la velocidad es de 40 Mbps y la frecuencia del láser para el primer canal se establece en 192,25 GHz, cuyo valor incrementará en cada canal 50 MHz para obtener el espaciado recomendado en DWDM [7] y se tomó como formato de modulación NRZ-OOK, debido a que es necesario escoger un formato adecuado que tenga un menor impacto en los efectos no lineales [12]. De acuerdo al diagrama de bloques de la Figura 2, cuyo diseño viene dado por el transmisor en Optsim®:

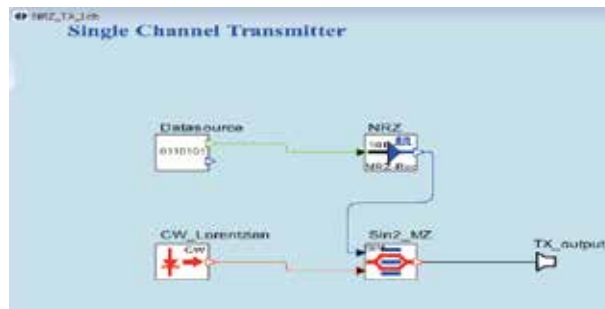


Figura 2. Subsistema transmisor de un canal simple

Fuente: Elaboración de los autores

Similar al esquema anterior, se adicionan los 16 canales, espaciados en 50 MHz a nivel de la frecuencia del láser, iniciando en 192,25 GHz y terminando en 193 GHz, los canales convergen la señal hacia un

multiplexor (Mux), el cual toma todas las señales emitidas por cada canal para transportarlas a través del medio óptico o canal principal y para efectos de comparación, se diseña un sistema de recepción *Back to Back*, conectado directamente al transmisor que permita conocer la forma del espectro, antes de verse afectado en el enlace y caracterizar la calidad del dispositivo receptor de forma independiente [13].

Canal de comunicación óptico-enlace

El diseño del canal originalmente fue planteado a través de un solo span de 200 km de longitud, sin embargo al comprobar los diversos efectos lineales y no lineales que afectan a la fibra, se optó por un diseño diferente, en el que se incluyen 5 span de 52,96 km cada uno, 5 amplificadores ópticos de potencia fija para compensar la atenuación por pérdidas [14] y 5 rejillas ópticas ideales, las cuales se insertan con el fin de compensar la Dispersión Cromática (CD) [15]. La señal que ingresa del Multiplexor, se combina en la fibra y culmina con la señal en el Demultiplexor (Demux) [16], dando la característica de ser un sistema. Para el estudio se utilizaron dos tipos de fibras: *DC* y *Allwave*, teniendo en cuenta las referencias de autores cuyos trabajos recomiendan su uso; en la Tabla 1 se ilustran las características de las fibras utilizadas en el proyecto de investigación.

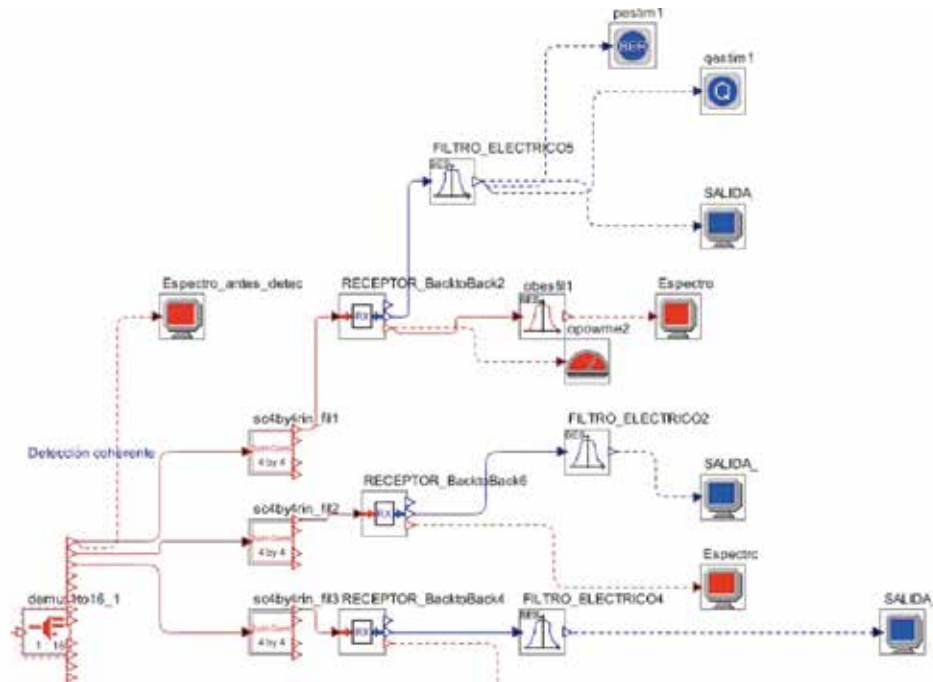
Tabla 1. Descripción de la fibra óptica

Fibra	Características		Unidad
<i>DC Anomalous</i>	Longitud del span	52,96	kms
	Pérdida	0,22	dB/km
	Dispersión	-25.509	ps ² /km o ps/nm/km
		2	
No Spans	5 spans de 52,96 c/u		
<i>Allwave</i>	Longitud del span	52,96	kms
	Pérdida	0,2	dB/km
	Dispersión	0	ps ² /km o ps/nm/km
	No spans	5 spans de 52,96 c/u	

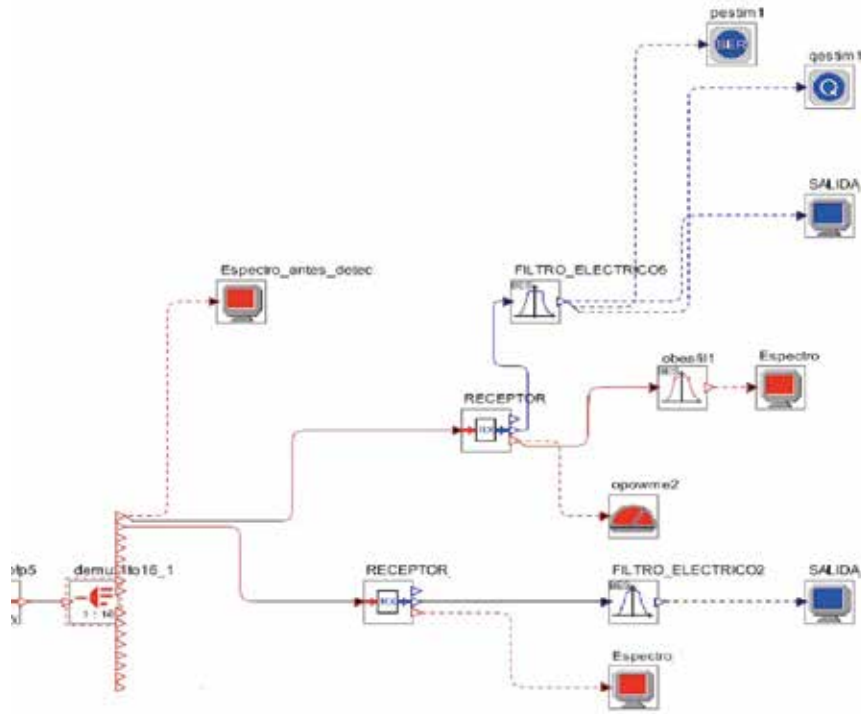
Fuente: Elaboración de los autores

Recepción

La etapa de recepción centra los resultados del desarrollo del proyecto; se plantea desde el punto de vista de la recepción coherente heterodina a través de un oscilador local interno, definido por el módulo de Optsim®. En esta etapa, la señal ingresa al módulo de detección coherente con Oscilador Local (interno o externo) y la salida, pasa hacia el detector óptico que es un fotodiodo de tipo PIN y posteriormente se incorpora un monitor de señal, mediante el cual se pretende evaluar aspectos como la BER, el factor Q, entre otros. Dado que los resultados de la investigación se centran en la etapa de recepción, se coloca especial cuidado en el diseño del receptor directo y coherente como se muestra en la Figura 3:



a. Receptor Coherente



b. Receptor Directo

Figura 3. Módulos de detección

Fuente: Elaboración de los autores

Receptor óptico directo

Este receptor no requiere de un diseño en especial, ya que se omite el uso de un oscilador local y de terminal híbrido, pues la señal que se recibe del multiplexor se envía en forma directa a un receptor, el cual convierte la señal óptica en eléctrica.

Receptor óptico coherente

Este receptor hace parte de los objetos disponibles en Optisim®, aunque también es posible diseñarlo mediante el uso de un oscilador externo. El receptor coherente se compone de un puerto de entrada de señal, la cual proviene del multiplexor, un oscilador local interno y cuatro puertos de salida, tal y como se observa el diseño del componente en la Figura 4:

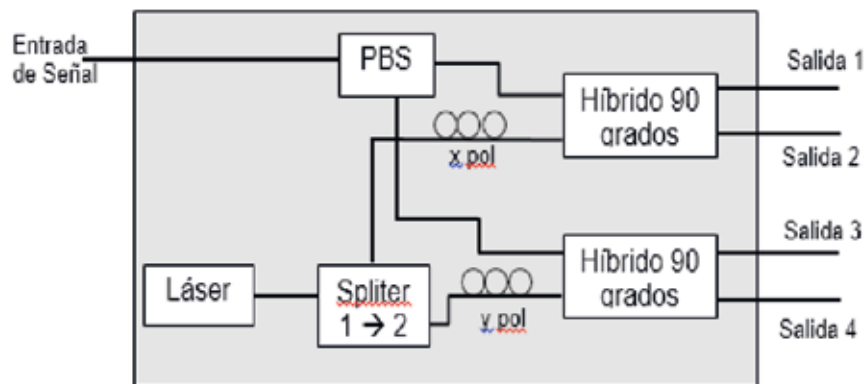


Figura 4. Esquema del terminal híbrido de 90 grados con oscilador local incluido

Fuente: Optisim® Models Reference: Sample Mode

Si se insertan fotodetectores en los cuatro puertos de salida, se obtienen cuatro señales de corriente eléctrica proporcionales a los cuatro componentes de la señal óptica recibida, permitiendo la detección coherente [17].

El láser, que trabaja como un oscilador local (LO) según [1], se representa por la ecuación 1.1.:

$$\bar{E}_{Lo}(t) = \sqrt{P_{Lo}} \cdot e^{j2\pi f_0 t} \cdot e^{j\phi_{Lo}(t)} + n_{RIN}(t) \quad \text{Ec. 1.1}$$

A la salida del terminal híbrido simple, se inserta un receptor óptico, parametrizado con un fotodiodo PIN, una velocidad de bits de 40 Gb/s y con un formato de pulso óptico NRZ rectangular, con el fin de llevar a cabo la detección coherente.

Con la generalización del sistema de comunicación, se establece el diseño de cada escenario de simulación, parametrizado según se observa en la Tabla 2:

Tabla 2. Parametrización de los casos de estudio

CASO DE ESTUDIO		
Parámetros Fijos	Formato de modulación	NRZ-OOK
	Velocidad de transmisión	40 Gb/s
	Número de canales	16
	Espaciamiento de canales	50 GHz
	Uso de compensador	Si
	Fotodetector	PIN
	Frecuencia Canal 1	192,25 THz
Parámetros variables dependiendo del efecto no lineal	Transmisor	
	• Potencia de transmisión	
	Canal	
	• Pérdida	
	• Rejilla compensadora	
	• Potencia del amplificador	
	• Tipo de fibra	
	• Longitud de la fibra	
	• Coeficiente de dispersión	
	Receptor	
	• Sensibilidad del fotodetector	
	• Filtro pasabanda: Ancho de banda -3dB	• 40 GHz
	• Detección coherente	• SI
	• Potencia del oscilador local (Exclusivo para detección coherente)	

Fuente: Elaboración de los autores

Etapas 4. Plan de evaluación y pruebas

Este plan permitió verificar los principales parámetros de recepción que impactan en un esquema de detección directa y coherente a través de la eficiencia espectral y para ello se analiza el comportamiento del escenario de simulación con valores típicos en los parámetros de transmisión de una red DWDM, para observar el funcionamiento del sistema, posteriormente se estudia su comportamiento según el caso correspondiente, en los cuales se tienen parámetros fijos como formato de modulación, velocidad de transmisión, número de canales y otros parámetros variables como el tipo de fibra y aquellos concernientes a cada efecto no lineal, para así verificar el impacto de dichas variaciones en el rendimiento del sistema.

Cada escenario permitió realizar un análisis espectral y encontrar las condiciones sobre las que se comporta mejor el sistema.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La obtención de los resultados se da partiendo de las condiciones que favorecen medianamente la transmisión y a partir de ellos se realiza un proceso de optimización. Como primera medida, se determina la distancia que alcanza cada span y para ello se busca satisfacer una BER menor de $1e^{-10}$ tal y como se presenta en la Figura 5 y en la Tabla 3.

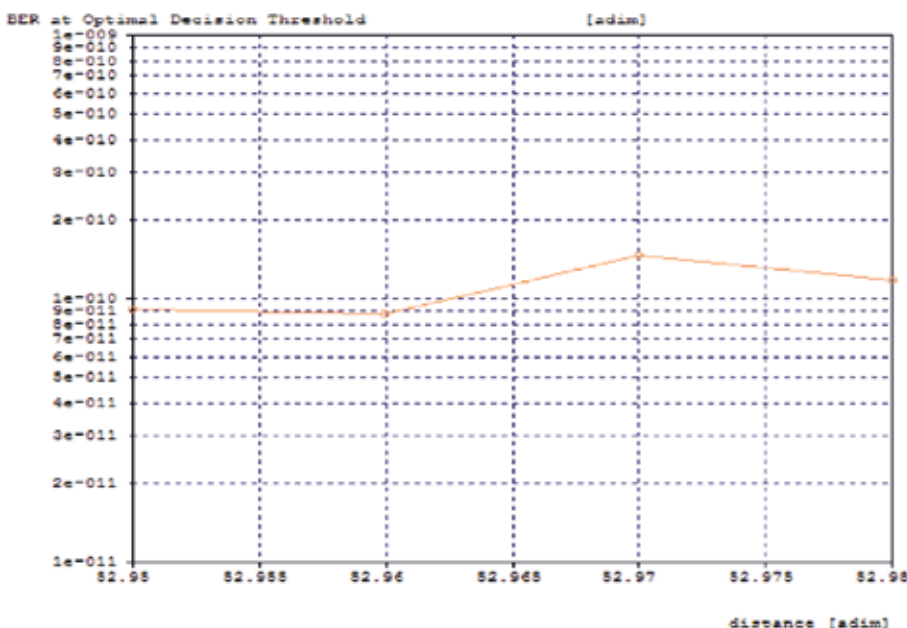


Figura 5. BER contra distancia de transmisión

Fuente: Elaboración de los autores

Tabla 3. Distancia máxima que se alcanza a una potencia de 0 dBm, espaciamento entre canales de 50 GHz y velocidad de transmisión de 40 Gb/s con el formato de modulación NRZ-OOK

Potencia en Transmisión [dBm]	Distancia máxima por span para BER=1e-011	Factor Q a Distancia Máxima	Portencia en Recepción
0 dBm	52,96 kms	16,074574 dB	-7,83495 dBm

Fuente: Elaboración de los autores

Los datos obtenidos en la Tabla 3 pueden compararse con los gráficos de la Figura 6, que corroboran los resultados del primer escenario. Los diagramas de ojo permiten hacer una comparación entre el receptor *back to back* y en el receptor al final del enlace, en el cual se aprecia la incidencia de los efectos no lineales en el mejor de los casos analizados. Posteriormente, se muestran los resultados del nivel de potencia en recepción en relación a la distancia, donde se evidencia la mejor recepción a una distancia de 52,96 kms y de igual manera se evalúa el Factor Q contra distancia, obteniendo que a la misma distancia, se obtiene la mejor calidad de señal.

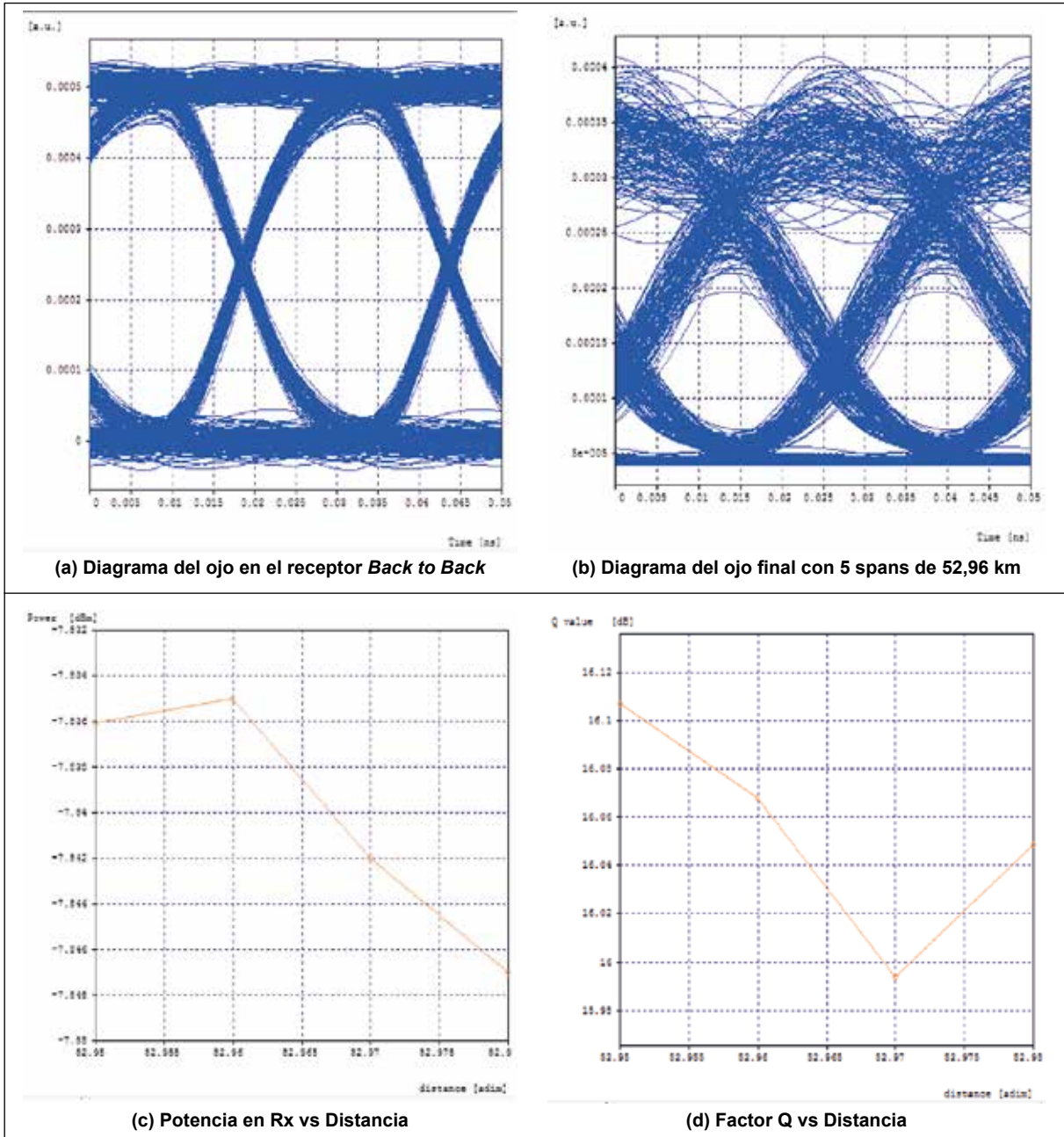


Figura 6. Diagramas de ojo para receptores *back to back* y final del canal a 1559.3886 nm, correlación, distancia 52,96 km

Fuente: Elaboración de los autores

Una vez definida la distancia por cada span para un total de 264,8 km en el enlace, se considera este parámetro en el análisis y se evalúa la potencia en el transmisor y la sensibilidad en el receptor, los resultados de la BER y de la calidad de la señal se presentan en la Tabla 4 realizando la comparación entre la recepción coherente y la recepción directa en los escenarios 1 y 2.

Tabla 4. BER y Factor Q para escenarios 1 y 2 tomando como referentes la potencia en el transmisor y la sensibilidad en el receptor

Valores para una distancia total de 264,8 kms con fibra DC Anomalous					
Potencia en el Tx	Sensibilidad del Rx	Escenario 1		Escenario 2	
		Con receptor coherente		Sin receptor coherente	
		BER	Factor Q	BER	Factor Q
0	-40	6,68986E-07	16,758572	8,053920E-07	16,729914
	-35	6,88456E-07	16,757520	8,019240E-07	16,729676
	-32	6,65456E-07	16,758312	8,026710E-07	16,729909
5	-40	5,31400E-07	15,916906	3,097420E-05	16,026271
	-35	5,24870E-06	15,916834	3,088750E-05	16,026265
	-32	5,33563E-05	15,916446	3,099710E-05	16,026155
10	-40	0,00205727	9,143475	0,00347055	9,140209
	-35	0,00205719	9,143493	0,00347051	9,140214
	-32	0,00205894	9,143605	0,00347136	9,140238
15	-40	0,0227501	6,020600	0,0227501	6,020600
	-35	0,0227501	6,020600	0,0227501	6,020600
	-32	0,0227501	6,020600	0,0227501	6,020600
20	-40	0,0227501	6,020600	0,0227501	6,020600
	-35	0,0227501	6,020600	0,0227501	6,020600
	-32	0,0227501	6,020600	0,0227501	6,020600
Potencia de Rx		-7,835		-3,00707	

Fuente: Elaboración de los autores

Los anteriores resultados evidencian que a determinadas características, se considera óptimo el funcionamiento de DWDM utilizando un detector coherente aunque existe una mejora significativa en la detección directa con una potencia de 5 dBm.

De igual manera, se procede a realizar un análisis, con la fibra *Allwave*, bajo las mismas condiciones y los resultados se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. BER y Factor Q para escenarios 3 y 4 tomando como referentes la potencia en el transmisor y la sensibilidad en el receptor

Valores para una distancia total de 272,5 kms con fibra Allwave					
Potencia en el Tx	Sensibilidad del Rx	Escenario 3		Escenario 4	
		Con receptor coherente		Sin receptor coherente	
		BER	Factor Q	BER	Factor Q
0	-40	4,88986E-08	17,140127	6,309100E-08	16,888929
	-35	5,06829E-08	17,140571	6,298230E-07	16,889227
	-32	4,93222E-08	17,140335	6,321160E-07	16,890045
5	-40	2,45910E-06	16,398753	4,646390E-06	16,356341
	-35	2,42462E-06	16,398611	4,600720E-06	16,356495
	-32	2,42510E-06	16,398048	4,633960E-06	16,356447
10	-40	1,95754E+00	12,227852	1,977257E+01	12,234753
	-35	1,95796E+00	12,227823	1,972510E+00	12,234746
	-32	1,95901E+00	12,227507	1,972700E+01	12,234670
15	-40	0,00537776	8,325090	0,00435435	8,329476
	-35	0,00537887	8,325105	0,00435427	8,329481
	-32	0,00537718	8,325141	0,00435441	8,329451
20	-40	0,0131830	6,891038	0,0132508	6,878629
	-35	0,0131833	6,891024	0,0132507	6,878626
	-32	0,0131841	6,891116	0,013251	6,878649
Potencia de Rx		-12,56520		-6,55011	

Fuente: Elaboración de los autores

De la Tabla 5 se puede deducir que para una potencia de 0 dBm en el transmisor, se obtiene la mejor BER, al igual que el mejor Factor Q o calidad de la señal con un sistema de detección coherente, hecho que se reitera ante el cambio de fibra propuesto para los casos de estudios 1 y 2.

4. CONCLUSIONES

- En un sistema DWDM dada la alta velocidad a la que se maneja la transmisión (40 Gb/s), juega un papel muy importante la compensación de dispersión con el fin de mitigar el efecto de automodulación de fase – SPM y la dispersión cromática – CD.
- En la evaluación realizada, se pudo evidenciar que la fibra *DC Anomalous*, presenta un mejor rendimiento frente a la fibra Allwave, debido a que esta última requiere un gran nivel de compensación en cada uno de los spans para alcanzar una mejor BER y SNR.
- La detección coherente presenta un mejor rendimiento a nivel de BER y Factor Q que la detección directa; esto se debe a la posibilidad de parametrizar algunos elementos dentro del detector coherente como son la potencia del Oscilador Local (LO) y el ruido de intensidad relativa (RIN).
- La escogencia de un formato óptimo frente a los efectos lineales y no lineales a una tasa de 40

Gbps, que mejore significativamente el desempeño de la red, dependerá de factores como la distancia de transmisión, la capacidad, la arquitectura de la red, el tipo de fibra y el uso de algunos recursos como la rejilla compensadora. Además de lo anterior, es importante mantener una potencia de 0 y 5 dBm para el transmisor con el fin de mitigar la mayoría de efectos no lineales.

- El análisis de los resultados obtenidos en el diseño del sistema DWDM propuesto permitió determinar que la dispersión cromática se encuentra fuertemente relacionada con el incremento de la potencia en el transmisor y donde un formato de modulación altamente tolerante a la CD como OOK, al igual que el uso de rejillas compensadoras con alto nivel de compensación, pueden aportar significativamente en el desempeño de la red.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 3rd ed. New York: Academic Press, 2001.
- [2] D. Alzate, A. Cárdenas, "Retos en la transmisión de 40/100Gb/s sobre fibra óptica", *Revista en Telecomunicaciones e Informática*, vol. 1, n° 2, pp. 23-60, 2011.
- [3] H. Ordóñez, J. P. Agredo, "Análisis de desempeño en redes WDM frente a variaciones en los parámetros de transmisión y su incidencia en los efectos no lineales", Popayán: Universidad del Cauca, 2012.
- [4] R. Pressman, *Ingeniería del Software, un enfoque práctico*. Madrid: McGraw-Hill, 2002.
- [5] P. A. Fishwick, "A taxonomy for simulation modeling based on programming". 1995. [On line]. Available: http://www.cee.mtu.edu/~amlan/ce5710/Readings/tax_sim.pdf. [Último acceso: 20-08-2013].
- [6] G. López, A. Toledo, G. Agredo, "Análisis del efecto del ruido en recepción de redes WDM con detección coherente", *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 7, n° 14, pp. 17-23, 2013.
- [7] K. Stamatios, *Introduction to DWDM Technology*. IEEE Press & Wiley interscience, 2000.
- [8] A. Barrios y J. Escallón, *Criterios para el monitoreo del canal óptico y la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana WDM*. Popayán: Universidad del Cauca, 2008.
- [9] G. Gómez, J. F. Grijalva, "Análisis del desempeño de formatos de modulación en comunicaciones ópticas sobre redes WDM", Popayán: Universidad del Cauca, 2010.
- [10] RSoft Design Group, Inc., *Optsim® User's Guide*, New York: RSoft Design Group, Inc., 2009.
- [11] G. Charlet, "Coherent detection associated with digital signal processing for fiber optics communication", *Comptes Rendus Physique*, vol. 9, n° 9-10, pp. 1012-1030, 2008.
- [12] R. Vij, N. Sharma, "1b/s/Hz Spectrally Efficient Transmission for an 8 Channel RZ Modulated DWDM Systems", de *International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication (CIEC)*, Calcuta, 2014.
- [13] F. R. Pascual, "Conectrónica, tecnología de elementos de conexión y conectividad: Instrumentación para medir la calidad de enlaces ópticos", 2015. [En línea]. Disponible: <http://www.conectronica.com/fibra-optica/instrumentos-para-fibra-optica/detectores-de-senal-optica/instrumentacion-para-medir-la-calidad-de-enlaces-opticos-medidores-de-ber>. [Último acceso: 7 10 2015].

- [14] R. Vij, N. Badhan, N. Sharma, "Enhanced Spectral Efficiency for Intensity Modulated DWDM systems", de *Twenty First National Conference on Communications NCC 2015*, Bombay, 2015.
- [15] L. Kadhim, *Optica fiber WDM/DWDM transmission*. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2010.
- [16] M.P. Thakur, S. Mikroulis, Renaud, J.E. Mitchell, and A. Stöhr, "DWDM-PON/mm-Wave Wireless Converged Next Generation Access Topology using Coherent Heterodyne Detection", de *16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Graz, 2014.
- [17] RSoft Design Group, Inc., *Optsim® Models Reference: Sample Mode*, New York: RSoft Design Group, Inc., 2009.