

Análisis de Desempeño de Diferentes Técnicas de Compensación Ópticas y Electrónicas para la CD en Redes WDM¹

Performance Analysis of Different Optical and Electronic Compensation Techniques for CD in WDM Networks

Daniel Fernando Melo Fernández

Estudiante de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones.

Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT, Universidad del Cauca.

dmelo@unicauca.edu.co

Jairo Andrés Ruiz Toledo

Estudiante de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones.

Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT, Universidad del Cauca.

jaruiz@unicauca.edu.co

Alejandro Toledo Tovar

Estudiante de Maestría en Ingeniería Área – Electrónica y Telecomunicaciones.

Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones.

Docente Asociado Universidad del Cauca.

Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT, Universidad del Cauca.

atoledo@unicauca.edu.co

Recibido Octubre 15 2011 – Aceptado Mayo 30 de 2012

RESUMEN

*El propósito de este artículo es compartir resultados obtenidos en el trabajo de grado titulado: “**Análisis de Desempeño de Diferentes Técnicas de Compensación Ópticas y Electrónicas para la CD en redes WDM**”,*

¹ El Trabajo de grado “Análisis de Desempeño de Diferentes Técnicas de Compensación Ópticas y Electrónicas para la CD en redes WDM”, fue desarrollado por Daniel Fernando Melo Fernández y Jairo Andrés Ruiz Toledo bajo la dirección del Ingeniero Alejandro Toledo Tovar, para obtener el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca. Además, hace parte del proyecto: Mejora en las Capacidades de Transmisión en Redes WDM, Metropolitanas, A 10 Gbps.

donde específicamente, se identificaron las principales características y se analizó el desempeño de diferentes técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD mediante simulación, con la aplicación OptSim® de Rsoft Design². Los parámetros considerados y evaluados se fundamentan en las características más relevantes de distintos estudios relacionados a las técnicas de compensación para la CD en redes WDM a 10 Gbps.

Palabras Clave: Dispersión Cromática (CD), Gestión de Dispersión Óptica (ODM), Compensación Electrónica de la Dispersión (EDC), Fibras Compensadoras de Dispersión (DCF)

ABSTRACT

The purpose of this paper is to share results obtained from the research project entitled: “Performance Analysis of Different Optical and Electronic Compensation Techniques for CD in WDM Networks”. The main features were specifically identified, and the performance of different optical and electronic techniques for compensation of CD by simulation, using the Software OptSim® of Rsoft Design was analyzed. The parameters considered and evaluated are based on the most relevant features of different studies related to techniques for CD compensation in WDM networks to 10 Gbps.

Key Words: Chromatic Dispersion (CD), Optical Dispersion Management (ODM), Electronic Dispersion Compensation (EDC), Dispersion Compensation Fiber (DCF).

1. INTRODUCCIÓN

Una red WDM que transmite a 10 Gbps tiene 16 veces más tolerancia³ a la dispersión⁴ cromática que una que trabaja a 40 Gbps (Binh, 2009), siendo notorio que al aumentar la velocidad de transmisión de una red WDM, en especial con valores superiores a 10 Gbps, los efectos de dispersión de

² Se clasifica como software licenciado y es un entorno que soporta el diseño y la evaluación de desempeño de sistemas de comunicaciones ópticas. Página web disponible en: www.rsoftdesign.com.

³ Para la investigación se define la tolerancia a la dispersión como el límite de dispersión o la máxima longitud alcanzada para una BER específica.

⁴ La dispersión produce un ensanchamiento temporal de los pulsos transmitidos, generando una superposición de los mismos y ocasionando una reducción en el ancho de banda de la fibra óptica, entre otros efectos.

los pulsos se convierten en una cuestión crítica en todas las clases de fibra óptica (Guitierrez, 2007) (Wayle, 1997) (Pizzinat, 2002).

La influencia de la CD puede ser reducida y la capacidad de transmisión puede ser mejorada, por medio de las técnicas de compensación para la CD en redes WDM, clasificadas en técnicas de compensación ópticas y técnicas de compensación electrónicas. Estas técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD, presentan muchas características atractivas en el desempeño de las redes WDM, siendo unos de sus principales propósitos la transmisión a altas velocidades y grandes distancias (Binh, 2009).

Las técnicas de compensación ópticas para la CD, son aplicadas en el canal óptico y están enmarcadas en una temática conocida como Gestión de Dispersión Óptica (ODM – Optical Dispersion Management) (Carena, 2010) (Mousavi, 1999). El principal elemento involucrado en la ODM es el Modulo Compensador de Dispersión (DCM - Dispersion Compensation Module) (Corning®, 2002) o también denominado Unidad Compensadora de Dispersión (DCU – Dispersion Compensation Unit) (Cisco®, 2007) (Carena, 2010), que tiene como fin compensar la CD acumulada en tramos de fibra óptica (Sangucho, 2009) (Pizzinat, 2002) (Olivares, 2007). La clasificación de los DCM's depende del elemento compensador que se utilice, ya sea Fibras Compensadoras de dispersión (DCF) o Fibras Bragg Grating (FBG) (Boquera, 2011) (Sangucho, 2009).

Para la presente investigación se eligen DCM's que emplean DCF's, debido a que es un elemento utilizado en redes WDM comerciales a 10 Gbps, además de operar a bajas potencias y efectos no lineales despreciables, (Pizzinat, 2002) (Olivares, 2007). Por esta razón, muestran en el dominio de la ODM una mayor utilización frente a las FBG.

2. TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ÓPTICAS PARA LA CD

Las técnicas de compensación ópticas para la CD, también son llamadas técnicas de compensación en línea, debido a que son aplicadas a lo largo del trayecto de fibra óptica (canal óptico). Estas técnicas están enmarcadas en ODM y tiene como finalidad compensar la CD por tramo de fibra óptica. Una herramienta esencial en el análisis de la ODM y diseño de redes WDM, es el mapa de dispersión, que muestra la variación de

la CD en función de la longitud del enlace óptico (Gualda, 2000) (ITU-T Rec.697, 2004). Las técnicas de compensación ópticas para la CD, se pueden optimizar mediante la variación de los parámetros de entrada del pulso, la distancia de amplificación, espaciamiento entre amplificadores, entre otros (Binh, 2009) (Wayle, 1997).

La ecuación 1 se utiliza para encontrar la longitud de la DCF (L_{DCF}), en relación con la longitud de la fibra óptica principal (L_{FOP}), el valor de la constante de dispersión para la fibra óptica principal (D_{FOP}) y el valor de la constante de dispersión para DCF (D_{DCF}). Las constantes de dispersión dependen de la ventana de trabajo.

$$D_{DCF}L_{DCF} + L_{FOP}D_{FOP} = 0 \quad (1)$$

La dispersión del pulso en función de la longitud de las fibras (L), las constantes de dispersión (D) y el ancho espectral del transmisor ($\Delta\lambda$) se representa como:

$$\Delta t = L_{FOP}D_{FOP}(\lambda)\Delta(\lambda) + L_{DCF}D_{DCF}(\lambda)\Delta(\lambda) \quad (2)$$

Teniendo en cuenta el lugar u orden donde se coloque el tramo de DCF en el trayecto de fibra óptica principal, las técnicas de compensación ópticas para la CD se clasifican en técnicas de post-compensación óptica, pre-compensación óptica y compensación simétrica (pre y post) óptica; en este trabajo se presentan resultados sobre las técnicas de pre-compensación y post-compensación, y se deja para posteriores estudios el análisis del desempeño de la técnica de compensación simétrica para la CD.

3. TÉCNICA DE POST-COMPENSACIÓN ÓPTICA PARA LA CD

La técnica de post-compensación óptica, Fig. 1, consiste en colocar un tramo de DCF después del tramo de fibra óptica principal, para poder compensar la CD acumulada en cada tramo. En esta técnica los pulsos son ensanchados y presentan un decremento en el nivel de la potencia (Jain, 2009), siendo dicho nivel más bajo que en el caso de la técnica de pre-compensación óptica; debido a esto, la técnica de post-compensación óptica muestra efectos no lineales más significativos.

En el mapa de dispersión para la técnica de post-compensación óptica, Fig. 3, se observa como el tramo de fibra óptica principal muestra un incremento de CD, de tal manera que al final del mismo tramo se expone

un valor positivo máximo de CD; con la introducción del tramo de DCF la CD se va reduciendo, por consiguiente la CD residual al final de tramo muestra un nivel significativamente menor.

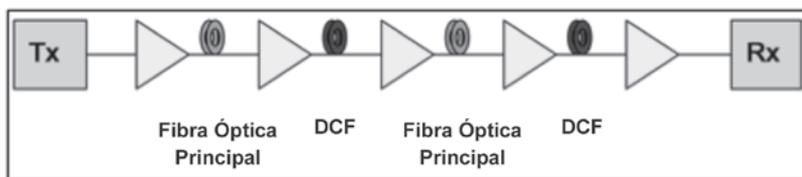


Figura 1. Técnica de post-compensación óptica para la CD

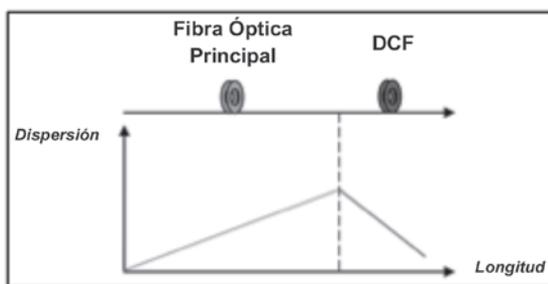


Figura 2. Mapa de dispersión de la técnica de post-compensación óptica para la CD

4. TÉCNICA DE PRE-COMPENSACIÓN ÓPTICA PARA LA CD

La técnica de pre-compensación óptica, Fig. 3, consiste en colocar un tramo de DCF antes del tramo de fibra óptica principal, con el fin de generar un valor de CD negativo que permita compensar la CD acumulada por cada tramo. Esta técnica conduce a una compresión del pulso, además de presentar un decremento en el nivel de potencia (Binh, 2009), siendo el nivel de potencia de la señal a la entrada de la DCF más alto que en el caso de la técnica de post-compensación óptica, por esta razón, la técnica de pre-compensación óptica presenta efectos no lineales menos significativos con respecto a la técnica de post-compensación óptica.

En el mapa de dispersión para la técnica de pre-compensación óptica, Fig. 4, se observa que el tramo de DCF muestra un incremento de la CD de forma negativa, de tal manera que al final del mismo tramo se presenta un valor negativo máximo. A partir de ese valor y con la presencia del

tramo de fibra óptica principal se expone un incremento de la CD, de tal forma que cuando el pulso llega al receptor se presenta una dispersión residual significativamente reducida.

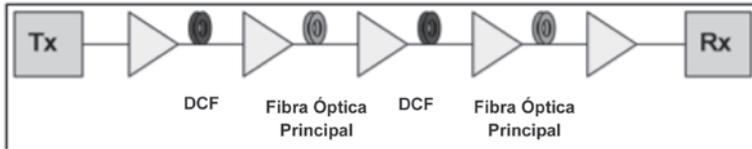


Figura 3. Técnica de pre-compensación óptica para la CD

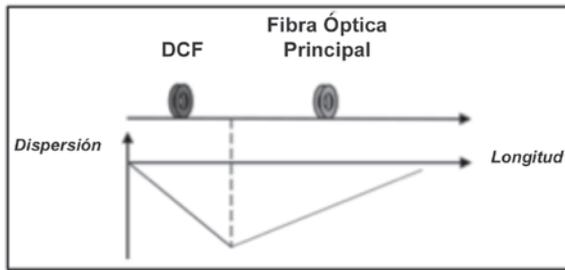


Figura 4. Mapa de dispersión de la técnica de pre-compensación óptica para la CD

5. TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN ELECTRÓNICA PARA LA CD

Las técnicas de compensación electrónicas para la CD, están enmarcadas dentro de una temática conocida como Compensación Electrónica de la Dispersión (EDC - Electronic Dispersion Compensation), donde el Procesamiento Digital de Señales (PDS - Digital Signal Processor) y la ecualización electrónica, tienen como funcionalidades según Binh (2009):

- Eliminar la CD residual acumulada al final del enlace, que las técnicas de compensación ópticas para la CD no pudieron compensar.
- Reducir los costos de la instalación de DCF's y amplificadores secundarios.
- Simplificar el despliegue y reconfiguración de la red WDM, ya que cada canal descubre y optimiza su propia CD, mediante procesamiento digital de señales y ecualización.

- Reducir las deficiencias lineales del canal causadas por filtros ópticos.
- Presentar una mayor tolerancia a las deficiencias del transmisor.
- Mostrar un mejor desempeño del sistema al usar fibras con alta dispersión.

El límite de la CD para un sistema con fibra óptica estándar (Rec. G.652 ITU-T) y EDC está denotado como⁵. Por otra parte, un sistema NRZ sin técnicas de compensación de dispersión presenta un límite de (Kaminow, 2008):

$$(\beta_2 L)_{3dB} = 0.12T^2 \quad (3)$$

La EDC está definida bajo la recomendación ITU-T G.959.1, en la cual se muestra información concerniente a la implementación de redes de largo alcance con fibras de estándar G.652; para el caso de estudio del presente trabajo de grado, cabe recalcar que una red WDM con EDC a una velocidad de 10Gbps y un patrón de código de línea NRZ, puede compensar cerca de 2400 ps/nm (120 km), obteniendo tasas de BER de 10^{-12} (ITU-T Rec. G.959.1. 2008). La EDC implementada en redes WDM a través de ecualizadores es ejecutada, mediante filtros transversales, diseñados para suprimir características no deseadas del canal, o también, para ajustarse (adaptativos) a variaciones del mismo (Furlong, 2003) (Singer, 2008).

Las técnicas de compensación electrónica para la CD basada en ecualizadores muestran mejores prestaciones o beneficios dependiendo de su ubicación y proceso de ecualización (Weiss, 2003). En cuanto a su ubicación se caracteriza por estar: en el lugar del transmisor-técnica de pre-compensación electrónica para la CD, en lugar del receptor-técnica de post-compensación electrónica para la CD, y simultáneamente en el lugar del transmisor y receptor-técnica de compensación electrónica simétrica o ecualización compartida para la CD. Se deja para posteriores estudios el análisis del desempeño de la técnica de compensación electrónica simétrica para la CD en redes WDM, donde su ejecución es justificable, debido a que su implementación requiere modelos matemáticos más avanzados, que se realizan conjuntamente con procesos de estimación para la detección de señales altamente degradadas por efectos lineales y no lineales, hechos que ocurren a velocidades de 40 Gbps y experimentales.

⁵ Es definida como la máxima GVD que puede ser tolerada con 3dB de penalidad de OSNR para una BER de 10^{-9} .

La EDC a diferencia de la ODM, es aplicada en cada uno de los canales a multiplexar en el transmisor, Fig. 5 (a), o en el caso contrario, en cada uno de los canales a demultiplexar en el receptor, Fig. 5 (b). (Binh, 2009).

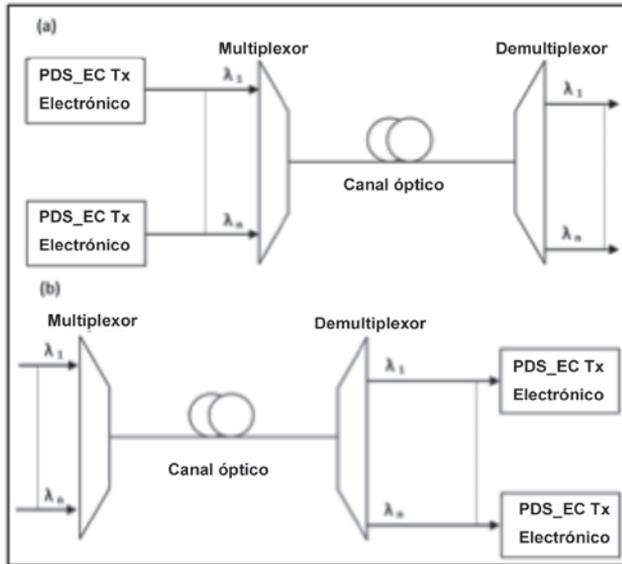


Figura 5. Disposición de ecualización en una red WDM con (a) una técnica de pre-compensación electrónica para la CD, (b) una técnica de pre-compensación electrónica para la CD. Leyenda: PDS_EC Tx: PDS con ecualización en el transmisor. PDS_EC Rx: PDS con ecualización en el receptor.

Proceso de Ecualización: Se clasifican mediante procesos lineales⁶ y no lineales⁷, como se muestra en la Figura 6. Los ecualizadores lineales se clasifican en Ecualizador basado en proceso Forzador de paso por Cero (ZFE - Zero Forcing Equalization), Ecualizador Feed Forward (FFE - Feed Forward Equalizer) y Ecualizador Lineal basado en Mínimo Error Cuadrático Medio (MMSE-LE – Minimizes Mean Square Error – Linear Equalizer). Los ecualizadores no lineales se clasifican en Ecualizador de Decisión Feedback (DFE - Decision Feedback Equalizer) y Ecualizador de

⁶ Los procesos lineales representan sistemas que obedecen a las propiedades de escalado (homogeneidad) y superposición (aditiva).

⁷ Los procesos no lineales representan sistemas cuyo comportamiento no es expresable como la suma de los comportamientos de sus descriptores, y no está sujeto a las propiedades de homogeneidad y superposición.

Secuencia de estimación de Máxima Probabilidad o Verosimilitud (MLSE – Maximun Likelihood Sequence Estimation) (Binh, 2009) (Freescales Semiconductor, 2007).

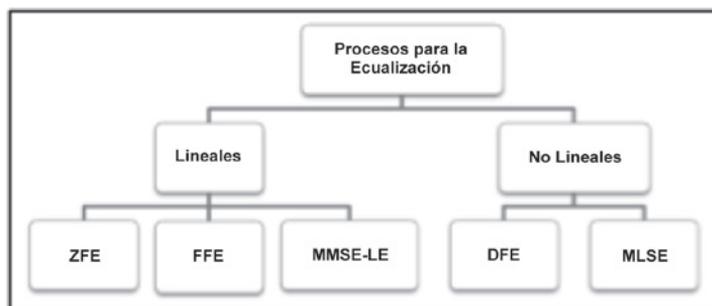


Figura 6. Procesos lineales y no lineales para la ecualización del canal óptico

5.1. Técnica de Post-compensación Electrónica para la CD

Las técnicas de post-compensación electrónicas para la CD implementadas en el lugar del receptor, Fig. 7, se denominan también técnicas de post-ecualización electrónica; el objetivo de estas técnicas es actuar sobre la CD de la señal transmitida después de recorrer la fibra óptica, tal y como se observa en el mapa de dispersión, Fig. 7. También es notorio en dicho mapa, que a medida que la señal se propaga por la fibra óptica, se presenta un decremento de potencia, para lo cual se colocan EDFA's (Amplificadores de Fibra Dopada de Erbio) a lo largo del trayecto de fibra óptica (Gutiérrez, 2007) (Buchali, 2006).

Gran parte de las redes WDM implementadas a nivel comercial, emplean la Modulación Directa y Detección Directa (IM/DD - Intensity Modulation/ Direct Detection) usando Fotodiodo PIN⁸ o Fotodiodo Avalancha (APD - Avalanche Photodiode)⁹ (Fernández, 2009); para este tipo de redes, el enfoque más común de EDC emplea la técnica de post-compensación electrónica para la CD basadas en ecualizadores FFE/DFE [31], donde un

⁸ Se llama diodo PIN a una estructura de tres capas, siendo la intermedia semiconductor intrínseco, y las externas, una de tipo P y la otra tipo N (estructura P-I-N que da nombre al diodo). Es sensible a un gran ancho de banda debido a que no tiene mecanismos de ganancia.

⁹ La ionización por impacto de átomos del semiconductor y los portadores generados por este, hace que se genere la ganancia de avalancha. La ganancia de un APD tiene influencia sobre el ancho de banda.

FFE con 7 taps¹⁰ y un DFE con 1 tap espaciados T/2 extienden el alcance en un orden de 60 a 100 km (Binh, 2009) (Balcioglu, 2010) (Gutiérrez, 2007).

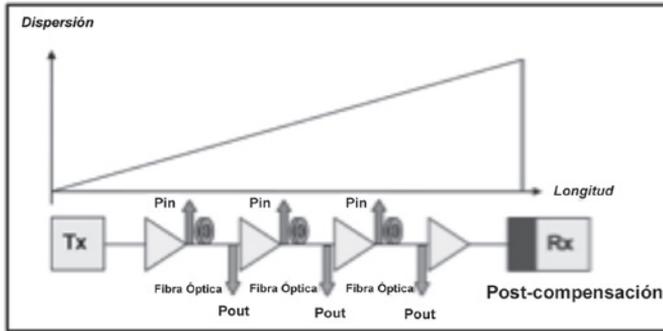


Figura 7. Post-compensación electrónica para la CD

5.2. Técnica de Pre-compensación Electrónica para la CD

Las técnicas de compensación electrónicas para la CD implementadas en el lugar del transmisor, Fig. 8, se denominan también técnicas de pre-compensación, pre-distorsión¹¹ o pre-ecualización electrónica (Binh, 2009) (Kikuchi, 2009). El objetivo de esta técnica es compensar la CD acumulada al final del enlace mediante un ecualizador FFE (Killey, 2009), dicho proceso de ecualización está orientado a la pre-distorsión de la señal antes de que sea detectada en el receptor como se observa en el mapa de dispersión, también es notorio en dicho mapa que a medida de que la señal se propaga por la fibra óptica, se presenta un decremento de potencia, para lo cual se colocan EDFAs a lo largo del trayecto de fibra óptica (Gutiérrez, 2007).

Como se ha indicado en la ecualización, la pre-distorsión en el transmisor puede ser ajustada mediante PDS, sin embargo, la longitud de la fibra y la CD tienen que ser conocidas para llevar a cabo dicho ajuste, lo que hace este tipo de técnica compleja en cuanto a su implementación

¹⁰ El número de taps hace referencia a la cantidad de memoria necesitada (registros digitales), la cantidad de retardo que se aplica a una señal y el filtrado que puede hacerse; estos son representadas como unidades de retardo en función del periodo de bit.

¹¹ La pre-distorsión de las señales ópticas se lleva a cabo mediante la modificación de la señales en el dominio electrónico.

pero altamente eficiente para compensar elevados valores de CD (Binh, 2009). Adicionalmente, su implementación con diferentes formatos de modulación es viable (Rosenkranz, 2007), ya que su dependencia se basa principalmente en el bloque que contiene el filtro transversal, sin embargo su diseño está sujeto al tipo de modulación que se esté aplicando (Binh, 2009) (González, 2004) (Gutiérrez, 2007).

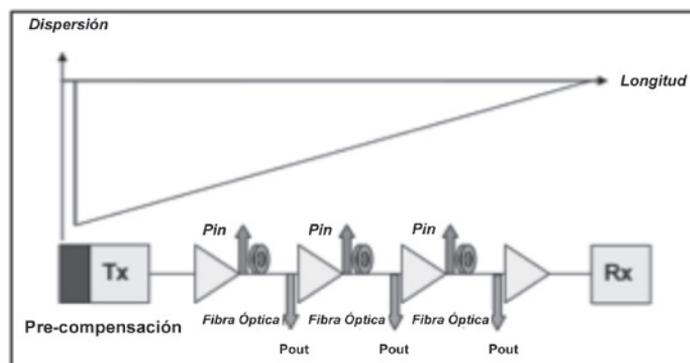


Figura 8. Pre-compensación electrónica para la CD

6. METODOLOGÍA

El desarrollo del trabajo de grado se fundamenta en las técnicas de compensación ópticas para la CD, con DCM que involucran DCF; mientras que, las técnicas de compensación electrónicas para la CD, se fundamentan en PDS con ecualizadores que involucran procesos DFE y FFE con la combinación del proceso MMSE. Con el fin de evaluar el desempeño de diferentes técnicas de compensación ópticas y electrónicas para la CD, utilizando formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ-DPSK, se presentan cinco (5) configuraciones basadas en un esquema/escenario de simulación, Fig. 9, distribuidas de la siguiente manera: **Configuración 1:** escenario de simulación con ausencia de técnicas de compensación, no aplica ODM ni EDC. **Configuración 2:** escenario de simulación con técnica de pre-compensación óptica para la CD, aplica ODM1. **Configuración 3:** escenario de simulación con técnica de post-compensación óptica para la CD, aplica ODM2. **Configuración 4:** Escenario de simulación con técnica de pre-compensación electrónica para la CD, aplican EDC1, EDC2, EDC3 y EDC4. **Configuración 5:** escenario de simulación con técnica de post-compensación electrónica para la CD, aplican EDC5, EDC6, EDC7 y EDC8.

Es así, como la Figura 10, muestra una configuración del escenario de simulación con la técnica de pre-compensación óptica para la CD, en la cual se aplica ODM1. La Figura 11 muestra la configuración del escenario de simulación con la técnica de post-compensación óptica para la CD, en la cual se aplica ODM2. Nótese que las técnicas de compensación ópticas para la CD se aplican en el canal de transmisión.

A continuación se detallan los rangos e incrementos de los parámetros establecidos en las simulaciones:

- La potencia de transmisión en un rango de a 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw.
- La longitud de la SSMF-28 (Fibra óptica Monomodo Estándar) en un rango de 70 a 120 km con incrementos de 5 km para las configuraciones con formato de modulación NRZ-OOK. Para las configuraciones con los formatos de modulación NRZ-DPSK se define la longitud de la SSMF-28 en un rango de 80 a 130 km con incrementos de 5 km. Los límites inferiores son establecidos en base a la tolerancia a la CD de los formatos de modulación NRZ-OOK (70 km) y NRZ-DPSK (80 km), para una potencia de 1 mw. Los límites superiores se fundamentan en estudios concernientes a las técnicas de compensación ópticas para la CD con formatos de modulación NRZ-OOK (120 km) y NRZ-DPSK (130 km).

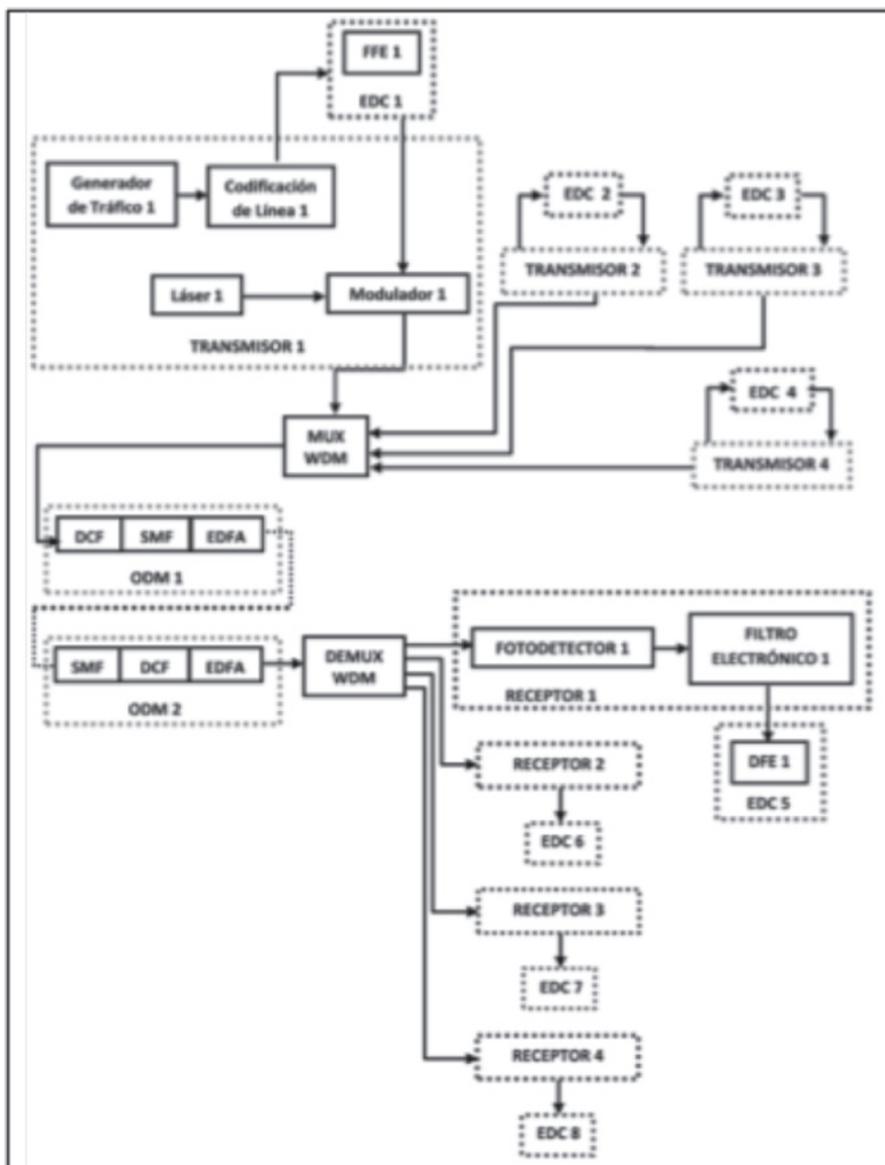


Figura 9. Esquema del escenario de simulación. Legenda: ODM1: Referente a la técnica de pre-compensación óptica. ODM2: Referente a la técnica de post-compensación óptica. EDC1, EDC2, EDC3, EDC4: Referentes a la técnica de pre compensación electrónica. EDC5, EDC6, EDC7, EDC8: Referentes a la técnica de post-compensación electrónica.

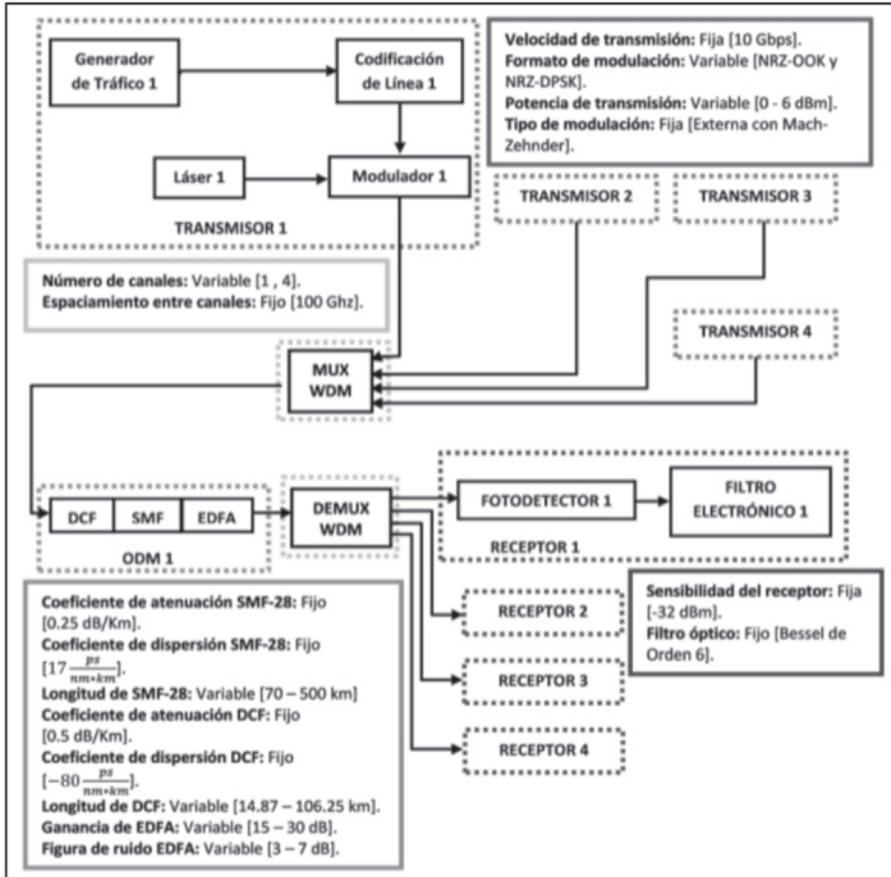


Figura 10. Configuración del Escenario de simulación con la técnica de pre-compensación óptica para la CD

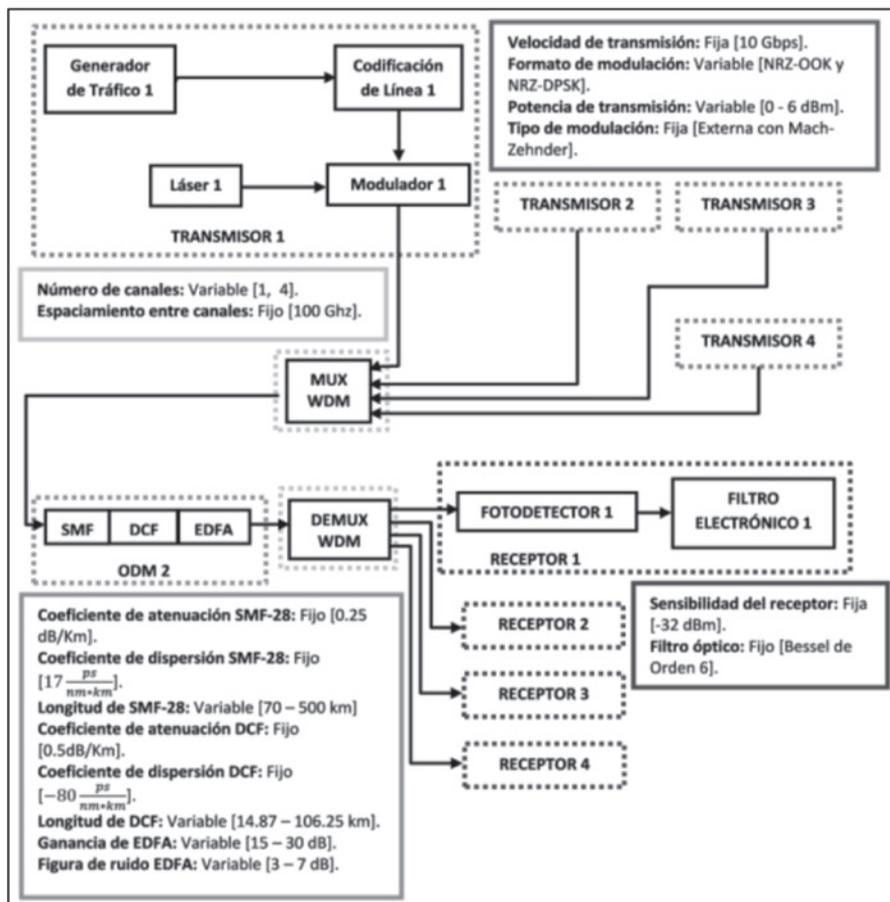


Figura 11. Configuración del Escenario de simulación con la técnica de post-compensación óptica para la CD.

La Figura 12 muestra la configuración del escenario de simulación con la técnica de pre-compensación óptica para la CD, en la cual se aplican EDC1, EDC2, EDC3 y EDC4. La Figura 13 muestra la configuración del escenario de simulación con la técnica de post-compensación óptica para la CD, en la cual se aplica EDC5, EDC6, EDC7 Y EDC8. Nótese que las técnicas de compensación electrónicas para la CD se aplican a cada uno de los canales a multiplexar y de-multiplexar.

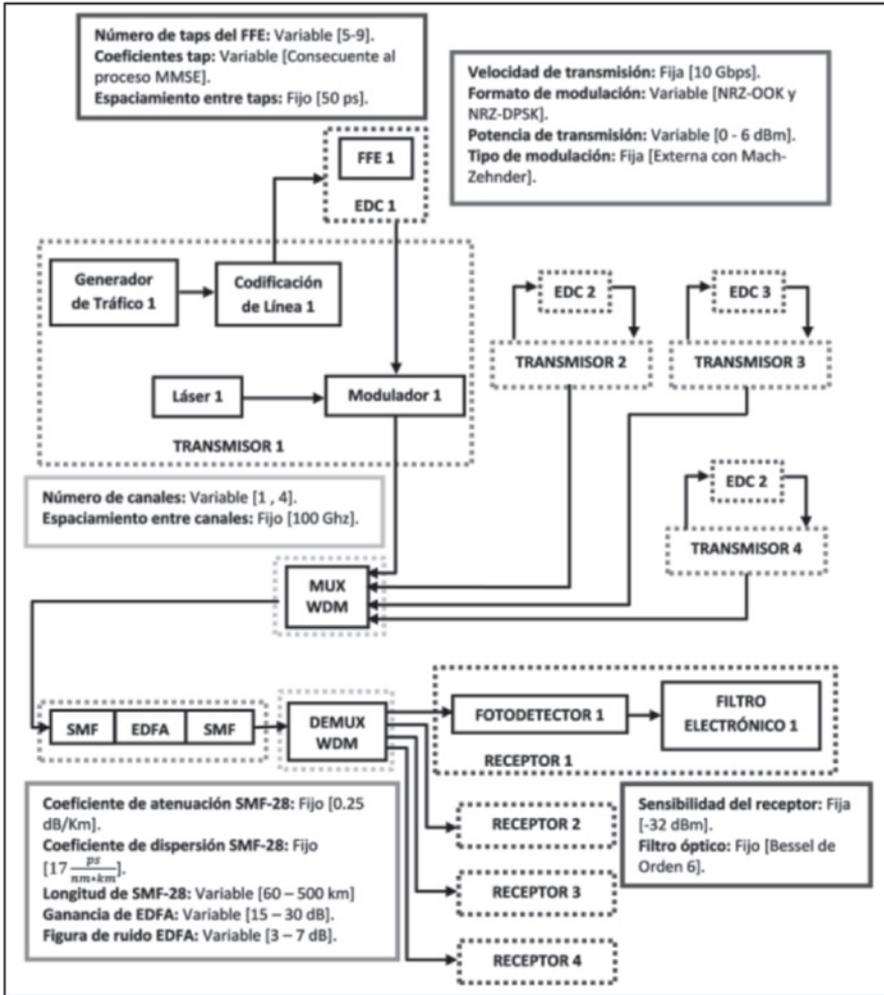


Figura 12. Configuración del escenario de simulación con técnica de pre-compensación electrónica para la CD

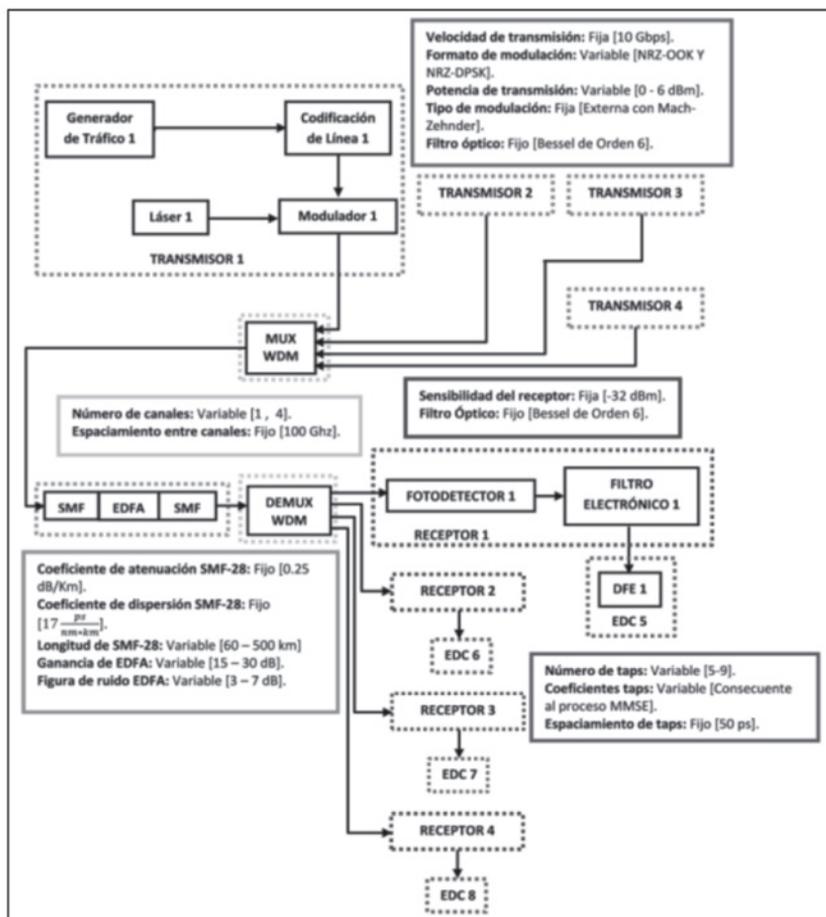


Figura 13. Configuración del escenario de simulación con técnica de post-compensación electrónica para la CD

A continuación se detallan los rangos e incrementos de los parámetros establecidos en las simulaciones:

- La potencia de transmisión en un rango de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw, potencia de lanzamiento en un rango de -10 a -5 dBm con incrementos de 1 dBm.
- Longitud de SSMF-28 de 70 a 120 km con incrementos de 5 km para las configuraciones con formato de modulación NRZ-OOK. Para las configuraciones con los formatos de modulación NRZ-DPSK se define la longitud de la SSMF-28 en un rango de 80 a 130 km con incrementos de 5 km. Los límites inferiores son establecidos con base

en la tolerancia a la CD de los formatos de modulación NRZ-OOK (70 km) y NRZ-DPSK (80 km) a una potencia mínima de 1 mw. Los límites superiores se fundamentan en estudios concernientes a las técnicas de compensación electrónicas para la CD con formatos de modulación NRZ-OOK (120 km) y NRZ-DPSK (130 km), conforme a la tolerancia a la CD de cada formato de modulación.

- Número de taps en un rango de 5 a 9 con incrementos de 1 tap. El rango definido se fundamenta en estudios concernientes a las técnicas de compensación electrónicas para la CD.
- Los ecualizadores son optimizados usando el criterio MMSE, para lo cual OptSim genera sus correspondientes coeficientes tap para un número de taps determinado.

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las actividades desarrolladas se enfocan en identificar mediante el análisis de desempeño (BER, Factor Q, Diagrama del Ojo, Mapa de Dispersión, entre otros parámetros de desempeño) de las técnicas de compensación óptica y electrónica para la CD evaluadas, las principales características a través de las cuales una red WDM presenta un desempeño óptimo. **Para la evaluación de las Técnicas de compensación ópticas para la CD**, se aborda a través de los siguientes enfoques:

1. Escoger la potencia de transmisión que permita alcanzar una máxima longitud cumpliendo con parámetros de desempeño establecidos por recomendaciones y/o operadores WDM.
2. Elegir la técnica de compensación óptica para la CD que presente mejores prestaciones en los formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ-DPSK.
3. Seleccionar el formato de modulación mediante el cual la técnica de compensación óptica elegida en el numeral anterior presenta un desempeño óptimo en una red WDM metropolitana.

Fundamentados en el análisis del desempeño de las técnica de pre y post compensación ópticas para la CD bajo formatos de modulación NRZ- OOK y NRZ-DPSK, se aprecia una dependencia de estas técnicas frente a la potencia de transmisión, para las cuales una condición de

máxima potencia de 4 mw genera las mejores condiciones en cuanto a un incremento de la tolerancia de los formatos de modulación y parámetros de monitoreo óptico.

En cuanto a las técnicas de compensación ópticas para la CD evaluadas, se encuentran leves mejorías en la técnica de pre-compensación frente a la técnica de post-compensación. En este numeral, al igual que diferentes estudios concernientes a las técnicas de compensación para la CD, se enfatiza el análisis de resultados en la OSNR, ya que a pesar de no mostrar las degradaciones temporales producidas en la señal, presentan una correlación en la BER y factor Q, constituyéndose en un parámetro de gran utilidad para la monitorización del desempeño en una red WDM. A continuación se resaltan, del análisis de desempeño evaluado, las medidas de OSNR de la técnica de pre-compensación y post-compensación en los formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ- DPSK.

Tabla 1. Medidas OSNR del número de spans necesarios para cubrir la longitud del enlace de 500 km. potencia de transmisión de 1 mw. Cada span tiene 70 km de SSMF-28 y 14.875 km de DCF. Técnica de pre-compensación y post-compensación para la CD con formato de modulación NRZ-OOK

Número de Spans	OSNR Pre-compensación	OSNR Post-compensación
1	19.89591	19.89471
2	17.34071	17.33941
3	15.72615	15.72453
4	14.54777	14.54583
5	13.62002	13.61763
6	12.85464	12.85186
7	12.20298	12.20003

Tabla 2. Medidas OSNR del número de spans necesarios para cubrir la longitud del enlace de 500 km. Potencia de transmisión de 1 mw. Cada span tiene 80 km de SSMF-28 y 17 km de DCF. Técnica de pre-compensación y post-compensación para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK.

Número de Spans	OSNR Pre-compensación	OSNR Post-compensación
1	17.10035	17.06190
2	15.42295	15.38914
3	14.20497	14.16641
4	13.25250	13.20630
5	12.47080	12.41525
6	11.80779	11.74212
7	11.23128	11.15688
8	10.72022	10.64081
9	10.26137	10.17929

De las Tablas 1 y 2 se corroboran las leves mejorías impuestas por la técnica de pre-compensación óptica para la CD en los formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ-DPSK. En representación de la distancia alcanzada con pre-compensación, para diferentes potencias de transmisión y con los formatos de modulación estudiados en el desarrollo del trabajo, se presentan las Figuras 14 y 15.

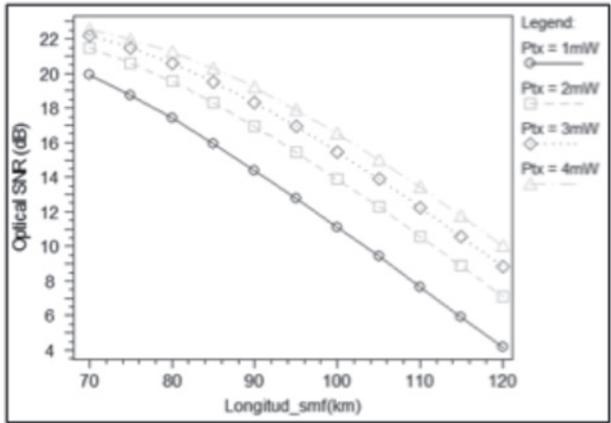


Figura 14. OSNR vs Longitud de SSMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con formato de modulación NRZ-OOK

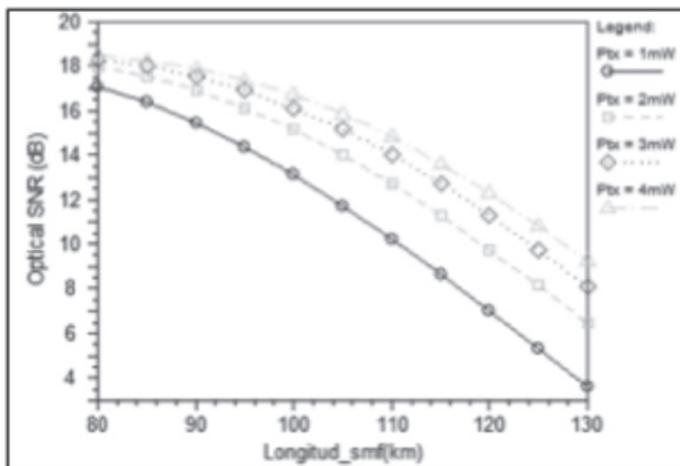


Figura 15. OSNR vs Longitud de SSMF-28. Técnica de pre-compensación óptica para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK.

Por otra parte, la técnica de pre-compensación óptica para la CD con el formato de modulación NRZ-OOK, para potencia máxima, extiende el alcance del enlace óptico de 70 km a 112 km de SSMF-28, compensando alrededor de 1800 ps/nm, mientras que el formato de modulación NRZ-DPSK el alcance se extiende de 80 a 125 km de SSMF-28, compensando alrededor de 2100ps/nm. Finalmente, las principales características mediante las cuales las técnicas de compensación para la CD presentan un desempeño óptimo, son:

- Potencia de transmisión de 4 mw.
- Longitud del span de 105.48 km compuesto por 87 km de SSMF-28 (tolerancia del formato de modulación NRZ-DPSK y 18.48 km de DCF).
- Técnica de pre-compensación óptica para la CD con formato de modulación NRZ-DPSK.

La evaluación de las Técnicas de compensación Electrónica, se aborda a través de los siguientes enfoques:

1. Escoger la potencia de transmisión que permita alcanzar una máxima longitud cumpliendo con parámetros de desempeño establecidos por operadores WDM.
2. Elegir la técnica de compensación electrónica para CD que presente mejores prestaciones en los formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ-DPSK.

3. Identificar el ecualizador que presenta las mejores prestaciones en la técnica de compensación electrónica para la CD.
4. Seleccionar el formato de modulación mediante el cual la técnica de compensación óptica elegida en el numeral anterior presenta un desempeño óptimo en una red WDM.

Fundamentados en el análisis de desempeño de la técnica de pre y post compensación electrónica para la CD bajo formatos de modulación NRZ- OOK y NRZ-DPSK evaluadas, se destaca la dependencia de estas técnicas frente a la potencia de transmisión, para las cuales una condición de máxima potencia de 4 mw ofrece las mejores condiciones en cuanto a un incremento de la tolerancia de los formatos de modulación y parámetros de monitoreo óptico. Por otra parte, Con base a las técnicas de compensación electrónicas para la CD para los formatos de modulación NRZ-OOK y NRZ- DPSK, se encuentra que la post-compensación electrónica con ecualizadores FFE-NL, DFE y en cascada FFE-NL y DFE, presenta mayor flexibilidad frente a la pre-compensación con el ecualizador FFE-NL, debido a que está última requiere una configuración y alteración más compleja en el transmisor, así como el cálculo independiente de los coeficientes tap, debido a que este no utiliza el criterio MMSE.

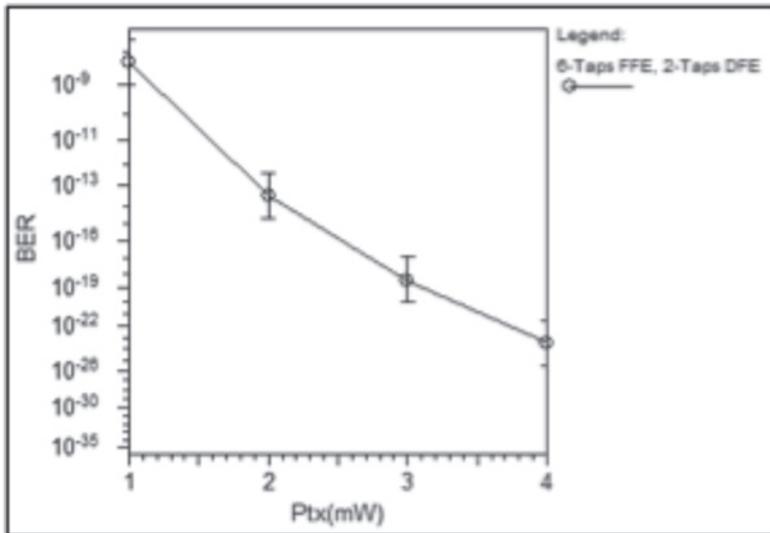


Figura 16. BER estimada vs Potencia de transmisión. Ecualizador DFE en el lugar del receptor. Formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 6 FFE y 2 DFE. Longitud SSMF-28 de 120 km

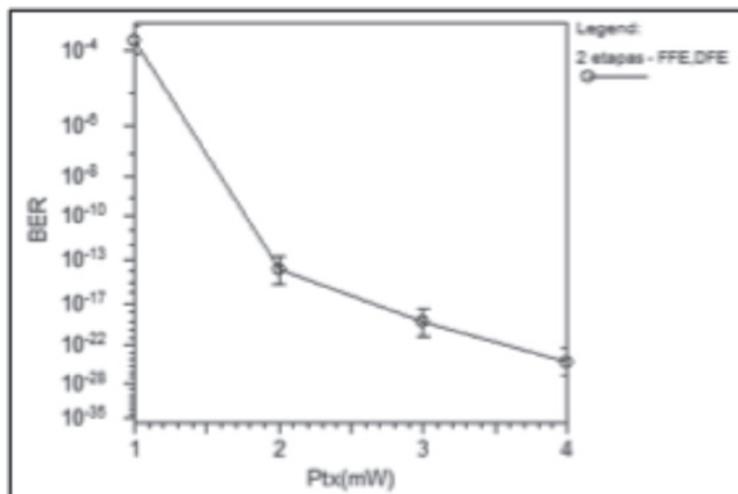


Figura 17. BER estimada vs Potencia de transmisión. Ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE en el lugar del receptor. Formato de modulación NRZ-OOK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 9 en la sección FFE de la primera etapa, 7 en la sección FFE de la segunda etapa con 2 DFE en la sección feedback. Longitud de SSMF-28 de 120 km

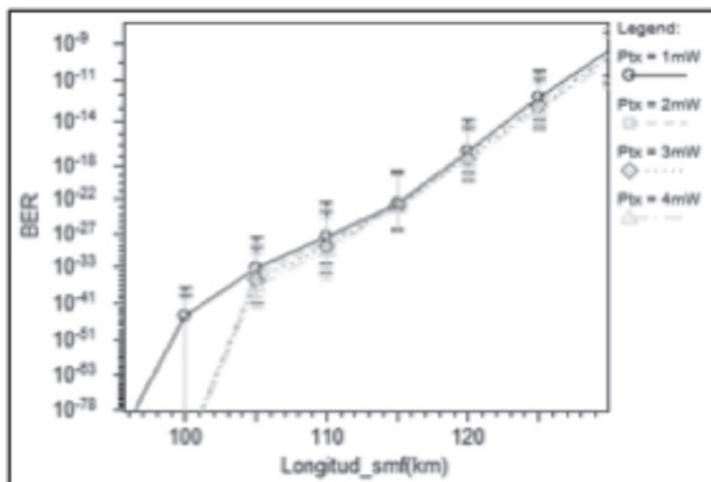


Figura 18. BER estimada vs Longitud de SSMF-28. Ecualizador DFE en el lugar del receptor, mono canal. Formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 en la sección FFE y 2 en la sección DFE. Longitud de SSMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km

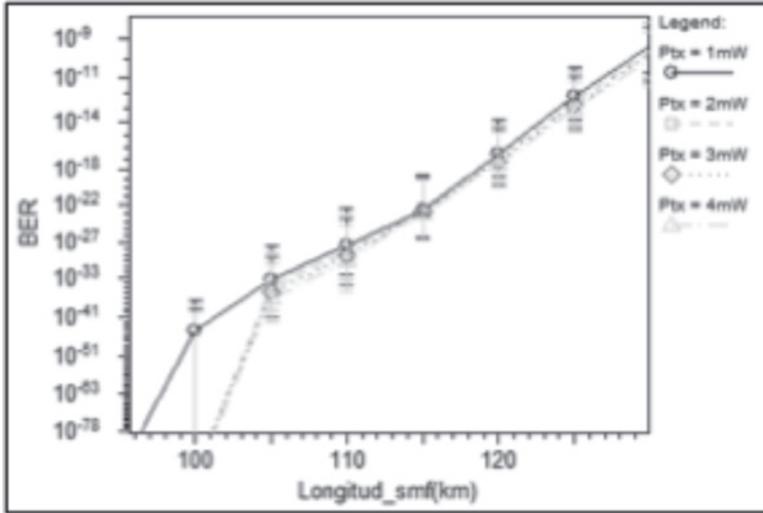


Figura 19. BER estimada vs Longitud de SSMF-28. Ecuador de dos etapas FFE-NL y DFE en el lugar del receptor. Formato de modulación NRZ-DPSK. Potencia de transmisión de 1 a 4 mw con incrementos de 1 mw. Número de taps: 5 taps en la sección FFE de la primera etapa, 7 taps en la sección FFE de la segunda etapa con 2 taps en la sección DFE. Longitud de SSMF-28 de 80 a 130 km con incrementos de 5km

De las figuras 16 y 17 que representan la BER respectivamente para el formato de modulación NRZ-OOK con el ecualizador DFE, y las figuras 18 y 19 que representan la BER y el factor Q respectivamente para NRZ-OOK con el ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE, se aprecia que ambos ecualizadores presentan un desempeño similar para compensar alrededor de 2021 ps/nm (aproximadamente 120km de SSMF-28) a máxima potencia, sin embargo, el ecualizador en cascada FFE-NL y DFE posee mejores prestaciones en el factor Q, mejorando de esta manera la calidad de la señal. Con base a lo anterior, se considera que el formato de modulación NRZ-OOK es el formato que más se beneficia de las prestaciones de la ecualización (a 10Gbps) aumentando la tolerancia de 70km a un poco más de los 120km, adicionalmente es un formato que comercialmente ha sido muy utilizado por su simplicidad en el despliegue, brindando la oportunidad a operadores WDM de extender el alcance de un enlace óptico sin cambiar la constitución del transmisor (formato de modulación) y receptor, inclusive hasta aumentar la velocidad sin cambiar la estructura de la red.

Bajo las anteriores consideraciones y con el objeto de ampliar aún más la

longitud de SSMF-28 a máxima distancia con ecualización, se obtienen las siguientes características de diseño:

- Potencia de transmisión 4 mw.
- Longitud de SSMF-28 entre 120 y 140km.
- Técnica de post-compensación electrónica para la CD con un ecualizador de dos etapas FFE-NL y DFE, que contiene 9 taps en la sección FFE de la primera etapa, 7 taps en la sección FFE de la segunda etapa con 2 taps en la sección feedback.
- Formato de modulación NRZ-OOK.

Finalmente, y considerando que uno de los aportes de este trabajo de grado consiste en presentar una comparación entre las técnicas ópticas y electrónicas para CD en redes WDM, se genera el resumen consignado en tabla 3.

Tabla 3. Análisis comparativo de las técnicas ópticas y electrónicas para la CD. Potencia de transmisión de 4mw. Velocidad de transmisión de 10 Gbps

Tipo de compensación	Óptica – ODM		Electrónica - EDC		
Técnica	Pre-compensación		Post-compensación		
Formato de modulación	NRZ-DPSK		NRZ-OOK		
Lugar donde aplica	En línea		En el lugar del receptor		
Elemento que interviene	DCF		Ecuilizador en cascada FFE-NL y DFE		
Parámetros	Coeficiente de atenuación (dB/km)	Coeficiente de dispersión (ps/nmkm)	Número de taps		
			Sección FFE primera etapa	Sección FFE segunda etapa	Sección feedback segunda etapa
	0.5	-80	9	7	2
Longitud (km)	SSMF-28	DCF	SSMF-28		
	125	26.56	136		
Dispersión Compensada (ps/nm)	2100		2290		
BER	1.9365e-009		4.1563e-009		
Factor Q (dB)	15.930		14.584		
OSNR (dB)	10.82		18.34		

8. CONCLUSIONES

El formato de modulación NRZ-DPSK con las técnicas de compensación ópticas para la CD tiene mejores prestaciones en los parámetros de desempeño ampliando el alcance de un enlace óptico WDM, siendo este el formato de modulación “ideal”, sin embargo es un formato más complejo de implementar tanto en transmisión como en recepción al utilizar un receptor balanceado.

Para configuraciones multicanal, se tiene que cada canal descubre su propia dispersión, las técnicas de compensación ópticas para la CD al realizar la compensación en línea, genera distintos valores de dispersión residual para cada canal, algo que se ve reflejado en los diferentes valores de monitoreo medidos en cada uno de estos, siendo los canales más altos, los que más dispersión residual poseen y por ende los que más sufren de degradaciones en la BER, factor Q y apertura del ojo.

Las técnicas de compensación electrónicas para la CD son considerablemente útiles para compensar alrededor de los 2290 ps/nm (aproximadamente 136 km de SSMF-28) sin necesidad de intervenir el tramo de fibra óptica principal, debido a que su configuración se halla en el lugar del transmisor y el receptor. La complejidad de una técnica electrónica para la CD se fundamenta en la capacidad computacional (velocidad en el procesamiento de la señal) del ecualizador, la cual está regida por el número de taps en las secciones de este mismo.

Para configuraciones multicanal, la post-compensación electrónica para la CD debe ajustarse de acuerdo a la cantidad de dispersión acumulada detectada en cada canal, con el fin de tener una relación de los parámetros de monitoreo óptico similar en todos los canales.

BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón, L. F. (2007). **Sistemas de Codificación**. Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería.
- Balcioglu, A., Patel, P., (2010). **Using Electronic Dispersion Compensation to Equalize Reflections in 8 Gb/s Fibre Channel Design**, EE Times News and Analysis.
- Binh, L. N. (2009). **Optical Fiber Communication Systems. CRC Press**. Pág. 425,428,432,433,459-472.
- Boquera, M.C. (2011). **Tutorial de Comunicaciones Ópticas**. Editorial Díaz Santos. <http://nemesis.tel.uva.es>
- Breuer, D., Jiirgensen, K., Kippers, F., Mattheus, A., Gabitov, I., Turitsyn, S.K. (1997). **Optimal Schemes for Dispersion Compensation of Standard Monomode Fiber Based Links**. ScienceDirect Optics Communications. Pág. 1-2.

- Buchali, F., (2006). **Advanced Electronic Equalization and Signal Processing for Optical Communication**, Alcatel-Lucent.
- Bülow, H. (2007). **Tutorial Electronic Dispersion Compensation**. Alcatel-Lucent. Pág. 12,13, 21, 23-24.
- Bülow, H., Buchali, F. y Klekamp, A. (2008). **Electronic Dispersion Compensation**. Journal of lightwave technology. Vol 26, No.1. Pág. 1,2.
- Carena, A., Curri, V., Poggiolini, P. y Forghieri, F. (2010). **Optical vs. Electronic Chromatic Dispersion Compensation in WDM Coherent PM-QPSK Systems at 111 Gbit/s**. IEEE Photonics Technology Letters. Pág. 1-2.
- Cisco®. (2007). **Dispersion Compensator Unit**. Hardware Description Manual. Pág. 2-3.
- Corning® Pure Form™ Single-mode Fiber. (2002). **DCM Modules for C-Band. Hardware Description Manual**. Pág. 1-2.
- Fernández, J. C., Fernández, L., (2009). **Estudio de Técnicas de Modulación para Enlaces Ópticos**, Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Cataluña, Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, especialización en Sistemas de Telecomunicación.
- Freescales S. (2007). **Decision Feedback Equalizer for StarCore®-Based DSPs**. Pág. 1-2.
- Freescales Semiconductor, (2007). **Decision Feedback Equalizer for StarCore®-Based DSPs**.
- Furlong, M., Ghiasi, A., (2003). **Electronic Dispersion Compensation Brings Native 10 Gbps to Networks**, Broadcom Corp®.
- Gonzales, E. (2004). **Igualadores de Canal para Comunicaciones de Datos**. Trabajo de Grado. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica. Instituto Politécnico Nacional. Pág. 13, 33.
- Gonzales, E., (2004). **Igualadores de Canal para Comunicaciones de Datos**, Trabajo de Grado, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica, Instituto Politécnico Nacional.
- Gualda, E. J. (2000) **Optimización de las Prestaciones de Enlaces Ópticos Submarinos de Gran Capacidad y Larga Distancia Mediante el Control de la Dispersión**, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, 2000.

- Gutiérrez, R. (2007). ***Diseño de un Enlace de Fibra Óptica***. Tesis de Grado. Universidad Nacional Autónoma de México. Pág. 2-7.
- Gutiérrez, R., (2007). ***Diseño de un Enlace de Fibra Óptica***, Tesis de Grado, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hernández, I. (2008). ***Procesado de Señal en Comunicaciones***. Pág.3-4,8-9.
- ITU-T Rec. G.959.1, (2008). ***Digital Sections and Digital Line System*** – Digital Line Systems, Telecommunications Standardization Sector of ITU.
- ITU-T Rec.697, (2004). ***Optical Monitoring for DWDM Systems***, Telecommunications Standardization Sector of ITU.
- Jain, B y KUMar, M. (2009). ***Simulative Analysis of Pre- and Post-Compensation Using CRZ Form at in WDM Optical Transmission on Link***, ScienceDirect Optik, Mayo, 2009.
- Kaminow, I.P., Willner, A. E., 2008. ***Optical Fiber Telecommunications***, Elsevier Inc.
- Kikuchi, N., (2009). ***Pre-equalized Optical Transmitter and Pre-equalized Optical Transmission Systems***, white paper.
- Killey, R.I., Watts, P.M., Bayvel, P., (2009). ***Electronic Precompensation Techniques to Combat Dispersion and Nonlinearities in Optical Transmission***, ***Optical Networks Group***, Department of Electronic and Electrical Engineering, University College London.
- Mousavi, F.M. and Kikuchi, K. (1999). ***Performance Limit of Long-Distance WDM Dispersion-Managed Transmission System Using Higher Order Dispersion Compensation Fibers***. IEEE. Pág.1-3.
- Olivares, R. (2007). ***Amplificación Óptica***. Universidad Técnica Federico Santa María. Departamento de Electrónica. Pág. 55-72.
- Pizzinat, A., Schiffini, A., Alberti, F., Paoletti, A., Caccioli, D., Griggio, P., Minzioni, P. y Matera, F. (2002). ***Numerical and Experimental Comparison of Dispersion Compensation Techniques on Different Fibers***. ***IEEE Photonics Technology Letters***. Vol 14, No. 10. Pág. 1-3.
- Polo, I. M. (2009). ***Optical Modulation for High Bit Rate Transport Technologies***. Sunrise Telecom®.

- Rosenkranz, W. and Xia, C. (2007). **Advanced Electronic Equalization for High-Speed Data Transmission Over Multi-Mode as Well as Single-Mode Optical Fiber**. Universidad of Kiel. Alemania.
- Rosenkranz, W., Xia, C., (2007). **Advanced Electronic Equalization for High-Speed Data Transmission over Multi-Mode as Well as Single-Mode Optical Fiber**, Universidad of Kiel, Alemania.
- Sangucho, C. E. (2009). **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 de maestría. Pág.89-93.
- Singer, A. C., Shanbhag, N. R. y Bae, H.M. (2008). **Electronic Dispersion Compensation**. IEEE Signal Processing Magazine. Pág.1-2.
- Singer, A. C., Shanbhag, Bae, N. R., H.M., (2008). **Electronic Dispersion Compensation**, IEEE Signal Processing Magazine.
- Vassilieva, O. (2007). **40 Gb/s & 100Gb/s Transport in the WAN**. Fujitsu Laboratories of America, Inc. Richardson. Texas.
- Vitesse. (2008). **EDC in LR and VR applications**. OFCNFOEC. Pág.1.
- Watts, P., Mikhailov, V., Savory, S., Glick, M., Bayvel, P. y Killey, R. (2009). **Electronic Signal Processing Techniques for Compensation of Chromatic Dispersion. Optical Networks Group. Department of Electronic and Electrical Engineering**. University College London. Pág.1-3.
- Wayle, J. and Sons. (1997). **Fiber Optics Communications Systems**. Editorial G.P. Agrawal.
- Weiss, A. J., (2003). **On the performance of electrical equalization in optical fiber transmission systems**, IEEE Photonics Technology Letters.
- Wu, L. y Chuang, L. (2006). **Electrical Dispersion Compensation (EDC)**. White Paper. Pág.6-7.
- Zhang, S. (2005). **Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System**. Tesis de Maestría, Universidad de Kansas.