

Impacto de las Propiedades de una Fibra Compensadora de Dispersión (DCF) en el Diseño de un Sistema WDM



**KELLY JULIETH HOYOS HORMIGA
JOAN SEBASTIÁN VÉLEZ GIRALDO**

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT
Popayán, Enero 2013**

Impacto de las Propiedades de una Fibra Compensadora de Dispersión (DCF) en el Diseño de un Sistema WDM

**KELLY JULIETH HOYOS HORMIGA
JOAN SEBASTIÁN VÉLEZ GIRALDO**

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

**Director
ALEJANDRO TOLEDO TOVAR**

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT
Popayán, Enero 2013**

A Dios por iluminar siempre mi camino, por ser mi guía y soporte en los momentos difíciles, a mi madre Gladys Hormiga por su apoyo, sus consejos, sus valores, su infinito amor y por su intachable ejemplo que me han permitido ser una mejor persona, a mi padre Richard Hoyos que me ha brindado su apoyo y por el valor demostrado para salir adelante, a mi hermana que es antes que nada mi amiga, mi orgullo y motivación, a mi abuelita por quererme y estar conmigo siempre.

A ellos les dedico con todo cariño este logro.

KELLY JULIETH HOYOS HORMIGA

Con cariño inmenso y total gratitud a Dios que me dio la fortaleza y me rodeo de ángeles, a mis queridos padres Ernesto Vélez y Belly Giraldo, pilares fundamentales que guiaron mi camino a lo largo de este proceso, con sus consejos y palabras llenas de amor; A mis hermanos Edward y Miguel, que compartieron cada una de sus experiencias conmigo y me brindaron su indiscutible apoyo y a mi novia, que con su ternura y amor me acompañó día a día, a todos ellos dedico este logro.

JOA N SEBASTÍAN VÉLEZ GIRALDO

AGRADECIMIENTOS

Durante el tiempo que duro el desarrollo de nuestro trabajo de grado, conocimos y aprendimos de muchas personas que aportaron no solamente a esta iniciativa sino también a nuestras vidas mismas.

En primer lugar, queremos agradecer a nuestro director, el ingeniero Alejandro Toledo, quien compartió con nosotros su conocimiento y experiencia para contribuir en nuestra formación como profesionales.

También agradecemos al grupo GNTT, y de manera especial a nuestro amigo el ingeniero Oscar Josué Calderón quien aportó con su conocimiento y experiencia al enriquecimiento de este trabajo de grado. Consejero que con su constante apoyo y orientación, no solo apporto en el plano científico, sino también en lo personal.

A todas las personas que aportaron constantemente a través de sus comentarios y sugerencias, gozan también de nuestros agradecimientos, pues fueron estas las razones que nos motivaron a continuar cuando nos acompañaba la desorientación. Entre ellas, el Ingeniero Víctor Miramá, la Ingeniera Claudia Hernández, al Ingeniero Guefry Agredo y el Ingeniero Gustavo Gómez.

Para finalizar, el más afectuoso agradecimiento para nuestras familias, quienes a través de la distancia, con cada llamada expresaron su apoyo y nos dieron razones para mantener la fortaleza, el ritmo y la dedicación, en el desarrollo de este trabajo de grado.

Si hoy hemos llegado hasta aquí ha sido gracias a todos ustedes.



TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION.....	1
CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA WDM Y PRINCIPALES PROPIEDADES DE UNA FIBRA COMPENSADORA DE DISPERSIÓN.....	3
1.1 Sistemas WDM	3
1.1.1 Sistemas DWDM.....	5
1.1.2 Factores a tener en cuenta en el diseño de un sistema WDM.....	7
1.2 Efectos lineales y no lineales	14
1.2.1 Efectos lineales.....	14
1.2.2 Efectos no lineales.....	17
1.3 Fibras Compensadoras de Dispersión	20
1.3.1 Propiedades de la DCF.....	21
1.3.2 Técnicas de compensación ópticas para la CD	24
CAPÍTULO 2. SIMULACIÓN, PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.	30
2.1 Herramienta de simulación	30
2.2 Metodología de Simulación.....	31
2.2.1 Generación del escenario y casos de simulación.	31
2.2.2 Identificación de los parámetros técnicos del escenario de simulación.	33
2.2.3 Ejecución de la simulación.....	36
2.2.4 Análisis de los Resultados de la Simulación.....	36
CAPÍTULO 3. DEFINICIÓN DE CONFIGURACIONES DE DESEMPEÑO DE UN SISTEMA WDM.....	66
3.1 Caso 1 de simulación. Formato de modulación NRZ-OOK.....	68
3.1.1 Escenario FOM-Alto 1.....	68
3.1.2 Escenario de FOM-Bajo 1.....	73
3.2 Caso 2 de simulación. Formato de modulación RZ-DPSK.....	77
3.2.1 Escenario FOM-Alto 2.....	77



3.2.2 Escenario de FOM-Bajo 2..... 81

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.87

4.1 Conclusiones..... 87

4.2 Recomendaciones 88

4.3 Trabajos Futuros..... 89

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Figura 1.1 Esquema de un sistema WDM [4].	4
Figura 1.2 Representación de las longitudes de onda en sistemas DWDM, según ITU [10].	5
Figura 1.3 Modulación (a) Directa y (b) Externa [16].	8
Figura 1.4 Configuraciones Bosster, Inline y Pre-amplificación del amplificador EDFA [25].	12
Figura 1.5 Dispersión modal [32].	16
Figura 1.6 (a) Configuración y (b) Mapa de dispersión de la técnica de pre- compensación óptica para la CD [1].	25
Figura 1.7 (a) Configuración y (b) Mapa de dispersión de la técnica de pre- compensación óptica para la CD [1].	25
Figura 1.8 (a) Configuración y (b) Mapa de dispersión de la técnica de pre- compensación óptica para la CD [1].	26
Figura 2.1 Escenario, casos de simulación y configuraciones a implementar.	32
Figura 2.2 Escenario de simulación.	32
Figura 2.3 Escenario de simulación en OptSim® para el caso 1. Formato de Modulación NRZ-OOK.	37
Figura 2.4 Diagrama del ojo (a) y Espectro óptico (b) de la señal NRZ-OOK en el receptor Back-to-Back.	38
Figura 2.5 Desempeño del enlace frente a variaciones de la longitud de la SSMF-28 de Corning.....	39
Figura 2.6 Comportamiento del enlace frente a variaciones de la longitud de la DCF.	41
Figura 2.7 Escenario de referencia 1.	42
Figura 2.8 BER vs Potencia para diferentes valores de atenuación de la DCF.	43
Figura 2.9 Amplificación EDFA.	44
Figura 2.10 Comportamiento del enlace implementando amplificación Raman.	45
Figura 2.11 Máximas distancias alcanzadas en el enlace ante las potencias (a) de trabajo, (b) promedio de trabajo y (c) máxima.	46



Figura 2.12 Comportamiento del enlace ante la variación de la potencia a diferentes valores del coeficiente de dispersión de la DCF. 48

Figura 2.13 Máxima longitud de la SSMF para diferentes coeficientes de dispersión de la DCF. 49

Figura 2.14 Máxima longitud de la DCF para diferentes coeficientes de dispersión de la DCF. 50

Figura 2.15 Desempeño del enlace ante la disminución del espaciado entre canales para diferentes coeficientes de dispersión de la DCF. 51

Figura 2.16 Escenario de simulación en OptSim® para el caso 2. Formato de Modulación RZ-DPSK. 52

Figura 2.17 Diagrama del ojo (a) y Espectro óptico (b) de la señal RZ-DPSK en el receptor Back-to-Back. 53

Figura 2.18 Desempeño del enlace frente a variaciones de la longitud de la SSMF-28 de Corning. 54

Figura 2.19 Comportamiento del enlace frente a variaciones de la longitud de la DCF. 55

Figura 2.20 Escenario de referencia 2. 56

Figura 2.21 BER vs Potencia para diferentes valores de atenuación de la DCF. 57

Figura 2.22 Amplificación EDFA. 58

Figura 2.23 Comportamiento del enlace implementando amplificación Raman. 58

Figura 2.24 Máximas distancias alcanzadas en el enlace ante las potencias (a) de trabajo, (b) promedio de trabajo y (c) máxima. 59

Figura 2.25 Comportamiento del enlace ante la variación de la potencia a diferentes valores del coeficiente de dispersión de la DCF. 61

Figura 2.26 Máxima longitud de la SSMF para diferentes coeficientes de dispersión de la DCF. 62

Figura 2.27 Máxima longitud de la DCF para diferentes coeficientes de dispersión de la DCF. 63

Figura 2.28 Desempeño del sistema ante la disminución del espaciado entre canales para cada coeficiente de dispersión de la DCF. 64

Figura 3.1 Comportamiento del canal 1, ante la variación de la potencia de transmisión. 68

Figura 3.2 Espectro óptico del canal 1, para valores de potencia de 10 y 24dBm. 69

Figura 3.3 Comportamiento del canal 1, ante los efectos XPM y FWM. 70

Figura 3.4 Espectro óptico del canal 1 para valores de potencia de 10 y 15dBm, de los efectos (a) XPM y (b) FWM. 71

Figura 3.5 Comportamiento del span, ante la variación de potencia del EDFA. 72

Figura 3.6 Comportamiento del canal 1, ante la variación de potencia de transmisión. 73

Figura 3.7 Espectro óptico del canal 1, para valores de potencia de 10 y 24dBm. 74

Figura 3.8 Comportamiento del canal 1, ante los efectos XPM y FWM. 75

Figura 3.9 Espectro óptico del canal 1 para valores de potencia de 10 y 18dBm, de los efectos (a) XPM y (b) FWM. 75

Figura 3.10 Comportamiento del canal 1, ante la variación de potencia de transmisión. 77



Figura 3.11 Espectro óptico del canal 1, para valores de potencia de 29 y 30dBm..... 78
Figura 3.12 Comportamiento del canal 1, ante los efectos XPM y FWM. 79
Figura 3.13 Espectro óptico del canal 1, para valores de potencia de 10 y 15dBm. De los efectos (a) XPM y (b) FWM. 79
Figura 3.14 Longitud máxima de la SSMF para un span..... 80
Figura 3.15 Comportamiento del canal 1, ante la variación de potencia de transmisión.... 81
Figura 3.16 Espectro óptico del canal 1, para valores de potencia de 10 y 24dBm..... 82
Figura 3.17 Comportamiento del canal 1, ante los efectos XPM y FWM. 83
Figura 3.18 Espectro óptico del canal 1, para valores de potencia de 29 y 30dBm..... 83
Figura 3.19 Longitud máxima de la SSMF para un span..... 84

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Parámetros típicos de los sistemas CWDM y DWDM[15].	7
Tabla 1.2 Parámetros generales de diseño de un sistema DWDM.	19
Tabla 1.3 Dispersión de fibras de transmisión alrededor de 1550nm [49].	23
Tabla 1.4 Parámetros de una DCF.....	27
Tabla 1.5 Parámetros de diferentes tipos de DCF.....	27
Tabla 2.1 Características, Parámetros y Propiedades más importantes para el escenario de simulación.	35
Tabla 2.2 Desempeño del escenario de referencia con DCF.	40
Tabla 2.3 Valores de atenuación de la DCF.	42
Tabla 2.4 Valores de potencia de transmisión.....	45
Tabla 2.5 Resumen de los resultados de la configuración de atenuación de la DCF.....	47
Tabla 2.6 Coeficientes de dispersión de la DCF.	48
Tabla 2.7 Resumen de los resultados de la configuración de dispersión de la DCF.	52
Tabla 2.8 Rango de potencias de transmisión.	56
Tabla 2.9 Resultados de la configuración de atenuación de la DCF.	60
Tabla 2.10 Resultados de la configuración de dispersión de la DCF.	64
Tabla 3.1 Parámetros generales del escenario FOM-Alto y de FOM-Bajo para caso de simulación.....	66
Tabla 3.2 Máxima distancia del enlace dependiente del número de span y del número de etapas de amplificación.....	72
Tabla 3.3 Máxima distancia del enlace dependiente de la configuración del número de span y las etapas de amplificación.....	76
Tabla 3.4 Máxima distancia del enlace dependiente de la configuración del número de span y las etapas de amplificación.....	81
Tabla 3.5 Máxima distancia del enlace dependiente de la configuración del número de span y las etapas de amplificación.....	84



INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el número de usuarios de Internet ha aumentado considerablemente, y a su vez han incrementado la demanda de nuevas aplicaciones y servicios, pasando de aplicaciones simples como el correo electrónico y la mensajería instantánea, a aplicaciones de Voz Sobre IP (VoIP, *Voice over IP*), Televisión sobre el Protocolo Internet (IPTV, *Internet Protocol Television*), entre otras. Este tipo de aplicaciones requiere cada vez mayores recursos de red, situación que conlleva a la necesidad de contar con redes más robustas, de mayor capacidad y más altas velocidades de transmisión, que sean diseñadas para proveer los recursos demandados por los servicios de los usuarios.

Los sistemas de comunicaciones ópticas basados en técnicas de Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*), se presentan como una de las mejores opciones para suplir dichas necesidades, debido a su robustez, facilidad de implementación, seguridad, mayor capacidad para el transporte de datos e inmunidad a interferencias electromagnéticas, características que le dan una gran ventaja frente a otros sistemas. Sin embargo, los sistemas WDM diseñados para largas distancias y altas velocidades de transmisión, se ven afectados por degradaciones debidas a efectos no lineales y lineales, destacando de estos últimos, la dispersión cromática [1], ya que limita la distancia máxima de transmisión. Con el fin de mitigar dicho efecto, se utilizan diferentes técnicas de compensación de la dispersión cromática, entre ellas se resalta el uso de Fibras Compensadoras de Dispersión (DCF, *Dispersion Compensation Fiber*), las cuales gracias a sus propiedades, tales como el índice de dispersión negativo, Figura de Mérito (FOM, *Figure of Merit*), atenuación, entre otras, contribuyen a contrarrestar las degradaciones generadas por la dispersión cromática.

Este trabajo de grado aborda el estudio y análisis del comportamiento de una DCF a fin de definir las principales propiedades y su impacto en el diseño de un sistema WDM. Este documento de trabajo de grado está constituido por cuatro capítulos y anexos que se distribuyen de la siguiente manera:

Capítulo 1. Características de un sistema WDM y principales propiedades de una fibra compensadora de dispersión.



En este capítulo se describen las características de un sistema WDM, específicamente de sistemas DWDM METRO, se detallan los efectos lineales y no lineales que los afectan y se identifican las principales propiedades de una DCF.

Capítulo 2. Simulación, pruebas y análisis de resultados.

Se desarrolla el proceso de simulación que permitirá analizar el impacto que las principales propiedades de la DCF, tales como la atenuación y el coeficiente de dispersión, tienen sobre el diseño de un sistema WDM. Para ello se hace uso de la herramienta OptSim® de Rsoft y se sigue una metodología de simulación, que permite implementar y evaluar los escenarios de simulación en el que se realizan pruebas. Se describe el análisis correspondiente al comportamiento del sistema.

Capítulo 3. Definición de las mejores configuraciones teniendo en cuenta la figura de mérito de la DCF, los efectos no lineales y etapas de amplificación para cada caso de simulación.

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en el capítulo 2, se hace uso de la FOM (propiedad de la DCF) para definir la(s) mejor(es) configuración(es) de desempeño para un sistema WDM. Se evalúan los efectos no lineales y las etapas de amplificación para este tipo de configuraciones.

Capítulo 4. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

Se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros, resultado del desarrollo del trabajo de grado.

Anexos.

Contienen los resultados de las simulaciones de los capítulos 2 y 3, con los valores de la BER, y Factor Q y sus respectivos diagramas del ojo.



CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA WDM Y PRINCIPALES PROPIEDADES DE UNA FIBRA COMPENSADORA DE DISPERSIÓN

Los sistemas WDM presentan algunas dificultades para responder a diferentes efectos de transmisión tales como los efectos lineales y no lineales, destacando de estos la dispersión cromática, la cual se convierte en una limitante de la longitud del enlace y la velocidad del sistema. Para combatir este efecto, entre otras opciones existentes, se hace uso de las DCFs que gracias a sus propiedades, contribuyen a disminuir las degradaciones de la dispersión cromática.

Para el desarrollo del presente capítulo, inicialmente se mencionan las características más importantes de los sistemas WDM, particularmente de los sistemas de Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*), su descripción modular, su despliegue en redes de Área metropolitana, y se detallan los efectos lineales y no lineales que los afectan. Finalmente se realiza una descripción de la DCF y se identifican algunas de sus principales propiedades.

1.1 Sistemas WDM

Los sistemas WDM se caracterizan por ser más eficientes en el transporte de grandes cantidades de información gracias a la posibilidad de multiplexar un número de longitudes de onda (canales)¹ sobre una única fibra óptica, la cual es utilizada como medio de transmisión. Lo anterior permite satisfacer de manera adecuada la necesidad de sistemas de gran capacidad para soportar la actual demanda de los servicios de Internet (video, audio, televisión de alta definición, entre otros) que cada vez son más robustos, complejos y requieren elevados anchos de banda.

WDM consiste en la transmisión de múltiples señales de luz por una sola fibra óptica, usando diferentes longitudes de onda espaciadas lo suficiente para que no interfieran entre sí; de esta manera la capacidad total del enlace equivale a la suma del volumen de datos que lleva cada longitud de onda, logrando así la optimización del ancho de banda de la fibra y mayores tasas de transmisión [2]. Los sistemas WDM se adaptan tanto a entornos de grandes distancias, como a entornos metropolitanos [3].

¹ En este trabajo de grado, los términos de longitud de onda y canal serán manejados indistintamente.

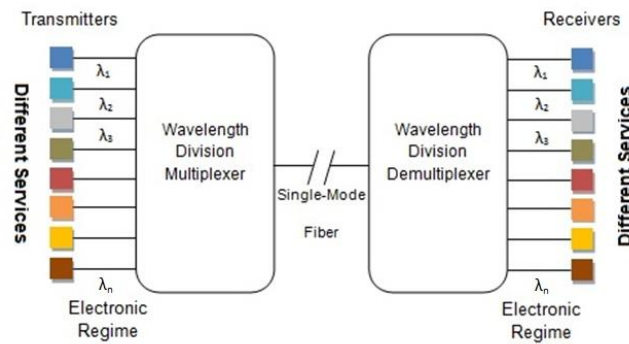


Figura 1.1 Esquema de un sistema WDM [4].

La figura 1.1 muestra el esquema simplificado de un sistema WDM, constituido básicamente por transmisores, un multiplexor WDM, el medio de transmisión, un demultiplexor WDM y los receptores de cada longitud de onda. Los transmisores están constituidos principalmente por láseres monomodo, cada uno modulando una longitud de onda diferente, las cuales se combinan en el multiplexor WDM antes de ingresar al medio de transmisión (fibra óptica); finalmente en recepción, las diferentes longitudes de onda se separan mediante un demultiplexor WDM y estas se entregan a los receptores respectivos [5].

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunication Union*) en las recomendaciones G.694.2 [6] y G.694.1 [7], clasifica los sistemas WDM en: Multiplexación por División de Longitud de Onda Ligera (CWDM, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*), y DWDM respectivamente. Los sistemas CWDM se basan en la separación de longitudes de onda cada 20 nm (o 2.500 GHz) dentro del rango de 1.271 a 1.611 nm; de manera que es posible transportar hasta 18 longitudes de onda en una única fibra óptica monomodo², lo que permite emplear componentes ópticos más sencillos y económicos que en los sistemas DWDM.

Los sistemas CWDM tienen una menor capacidad y la distancia de transmisión es más pequeña, por lo cual se implementan principalmente en redes empresariales y redes metropolitanas de corto alcance.

Las limitaciones presentadas por CWDM, se mejoran con la implementación de sistemas DWDM, ya que estas brindan un espaciamiento entre longitudes de onda menor y por ende permiten que un mayor número de ellas se multiplexen sobre la fibra óptica, aumentando de forma considerable su capacidad de transporte.

² Es un tipo de fibra que debido a su pequeño núcleo permite la propagación de un único modo o rayo de forma directa por la fibra, sin reflexión; lo anterior, proporciona un elevado ancho de banda y permite alcanzar largas distancias.

A continuación se describe con mayor detalle los sistemas DWDM ya que estos son parte fundamental en el desarrollo del presente trabajo de grado.

1.1.1 Sistemas DWDM

Para hacer uso del gran ancho de banda que posee la fibra óptica y así incrementar la capacidad de transmisión de la redes ópticas, se han desarrollado sistemas como DWDM, que permiten acomodar en una única fibra alrededor de un centenar de longitudes de onda, gracias a que el espaciamiento entre ellas es menor que el logrado en los sistemas WDM convencionales. DWDM no necesita realizar nuevos tendidos de fibra, facilidad que permite expandir y desarrollar redes más rápido y eficientemente [8], [9], [10].

DWDM se caracteriza por realizar multiplexación y demultiplexación de diferentes longitudes de onda ópticas, independiente del esquema de modulación y de las velocidades que cada una de ellas este utilizando.

En la figura 1.2 se muestran las bandas de operación de los sistemas ópticos.

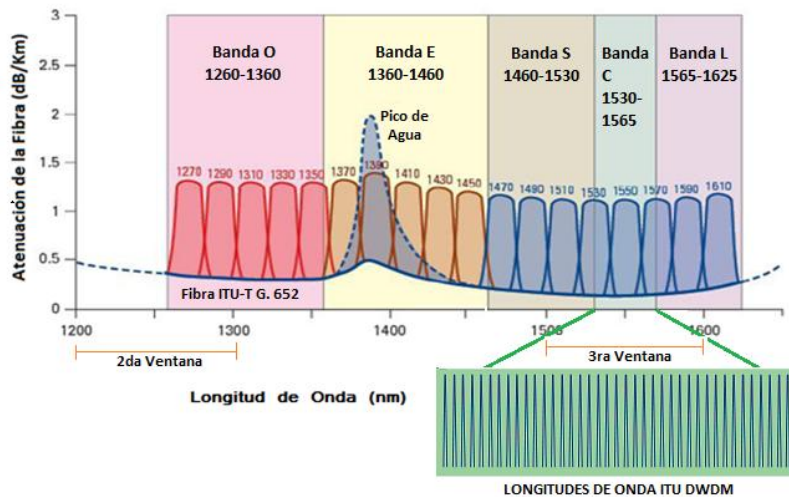


Figura 1.2 Representación de las longitudes de onda en sistemas DWDM, según ITU [11].

Los sistemas de transmisión por fibra óptica se implementan típicamente en tres regiones del espectro óptico llamados ventanas de operación, de las cuales la segunda y tercer ventana son mostradas en la figura 1.2. A continuación se describen los rangos de cada una y sus efectos sobre la fibra ITU-T G. 652 escogida para el desarrollo de este trabajo:



- Primera ventana: Tiene un rango de 800 a 900 nm. Las pérdidas de la fibra ITU-T G. 652 es alta en esta región y se utiliza sólo para transmisiones de corto alcance.
- Segunda ventana: Va desde 1200 a 1300nm y abarca parte de la banda de operación O.
- Tercera ventana: El rango va desde 1500 a los 1600nm y abarca parte de las bandas S y L y toda la banda C, donde esta última junto con la banda L, son recomendadas por el estándar ITU G.694.1 para uso de los sistemas DWDM, dado que la atenuación de la fibra ITU-T G 652, es menor con respecto a las otras bandas de operación, sin embargo la banda C es la más utilizada debido a que la atenuación de la fibra es aún menor que en la banda L [12].

DWDM también se implementa en distintos entornos de red, tales como Long Haul, SAN y Redes de Área Metropolitana (MAN, *Metropolitan Area Network*). El desarrollo del presente trabajo de grado se realiza en un contexto de sistemas DWDM en un entorno MAN. De ahora en adelante cuando se habla de sistemas WDM, se hace referencia implícitamente a sistemas DWDM.

Sistemas DWDM en Redes de Área Metropolitana: Las redes MAN, cubren el área de una ciudad o varias ciudades cercanas, que hacen de interfaz entre las redes Long Haul y las redes de acceso SAN. Los sistemas DWDM MAN permiten conectar una amplia variedad de protocolos de los diversos clientes empresariales y residenciales, quienes a través de sus redes de acceso pueden alcanzar las grandes distancias a las cuales se encuentran sus proveedores de servicios. Las longitudes de onda para DWDM MAN van desde los 1280 a los 1625 nm, es decir, abarcan la segunda y tercera ventana de comunicaciones ópticas lo que permite alcanzar un ancho de banda teórico por fibra de 1600 Gbps y en consecuencia utilizar filtros ópticos y láseres menos complejos y baratos. Los sistemas MAN utilizan arquitecturas en anillo a diferencia de las redes Long Haul que utilizan arquitecturas punto a punto [13] [14] [15].

En la tabla 1.1 se resumen los principales parámetros típicos de los sistemas CWDM y DWDM.



Tabla 1.1 Parámetros típicos de los sistemas CWDM y DWDM [16].

CARACTERÍSTICAS	Tecnologías WDM y Entornos		
	CWDM	DWDM MAN / WAN	DWDM Long Haul
Espaciamiento entre Canales	20 nm (2500GHz)	0.8 nm (100GHz)	0.4 nm (50GHz)
Bandas Utilizadas	O, E, S, C, L	C, L	C, L, S
Canales por Fibra	4 – 16	32 – 80	80 – 160
Capacidad por Canal	2.5 Gbps	10 Gbps	10 – 40 Gbps
Distancias Típicas	Hasta 80Km	Cientos de Km	Miles de Km
Costos	Bajo	Medio	Alto

1.1.2 Factores a tener en cuenta en el diseño de un sistema WDM

Una vez definido el entorno DWDM metropolitano sobre el que se trabajará, se enuncian algunas consideraciones de diseño del sistema, las cuales estarán basadas en aspectos técnicos.

La mayoría de los enlaces de comunicación por fibra óptica establecidos en las redes actuales, siguen una conexión punto a punto, independiente de las topologías físicas que se definan. Los elementos básicos en las conexiones punto a punto son: El transmisor, el medio de transmisión y el receptor [17], [18], [19], [20].

A continuación se describen los componentes y parámetros que caracterizan estos elementos:

A. Transmisor

Es un dispositivo electrónico encargado de transformar la señal eléctrica de entrada en una señal óptica de salida. Esta última, será la onda portadora que llevara la información hacia el receptor a través de la fibra. Este módulo está definido por la fuente óptica, el modulador y los parámetros correspondientes a estos componentes [21], [12].

- Tipo de fuente óptica: Los sistemas de comunicación óptica usualmente usan fuentes ópticas semiconductoras tal como los Diodos Emisores de Luz (LEDs, *Light-Emitting Diodes*) y los láser semiconductores, conocido también como

diodos láser o láser de inyección [18]. Para sistemas basados en fibra multimodo, la fuente óptica utilizada típicamente es el LED; mientras que para sistemas con fibra monomodo, se usa los láser debido a que estos presentan una alta eficiencia de acoplamiento [17].

- **Potencia de transmisión:** Es el nivel de energía inyectado por la fuente óptica a la onda portadora. El valor de potencia, normalmente, tiene un valor entre los 0 – 7dBm [15]; sin embargo, dependiendo del tipo de fuente, la distancia del enlace y el formato de modulación, estos valores pueden aumentar o disminuir. Implementar valores elevados de potencia incurrirá en la aparición de efectos no lineales en el sistema, razón en la que radica su importancia como parámetro de diseño.
- **Tipo de modulación:** Existen dos métodos mediante los cuales puede ser modulada una fuente de luz, el primero por modulación directa y el segundo por modulación externa. Por un lado, en la modulación directa la fuente de datos llega al láser y ahí es modulada por el mismo antes de ser transmitida. Por otra parte, la modulación externa hace uso de un dispositivo propio de modulación, que reúne la fuente de datos y la fuente óptica para llevar a cabo el proceso de modulación. La figura 1.3, muestra estos dos métodos.

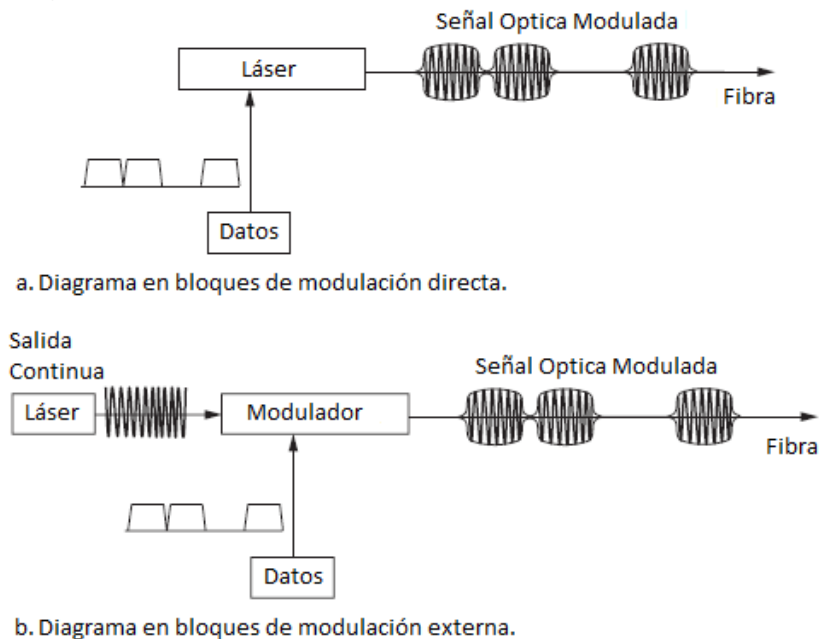


Figura 1.3 Modulación (a) Directa y (b) Externa [17].



Los sistemas WDM de tasas de transmisión de 10Gb/s o superior utilizan el método por modulación externa, debido a que a estas velocidades la modulación directa genera frecuencias chirp³ y limita la velocidad de modulación del láser [17].

- Formato de modulación: Existen diferentes formatos de modulación en los sistemas de comunicación ópticas tales como: Modulación por Encendido y Apagado (OOK, *On-Off Keying*), Modulación por Desplazamiento Diferencial de Fase (DPSK, *Differential Phase Shift Keying*), Modulación por Desplazamiento Diferencial en Cuadratura de Fase (DQPSK, *Differential Quadrature Phase Shift Keying*), entre otros, que permiten contrarrestar algunos efectos lineales y no lineales que sufre la señal en la transmisión a altas velocidades o largas distancias.

Uno de los formatos más conocidos y difundidos es el OOK debido a su fácil implementación, costo reducido, baja complejidad, entre otros; sin embargo, atendiendo a la demanda de sistemas de transmisión de largas distancias y velocidades mayores a 10Gbps se han implementado formatos más robustos como los DPSK y DQPSK.

Para la selección de un formato adecuado en un sistema DWDM, se deben tener en cuenta principalmente la tolerancia al efecto que se desea mitigar y la velocidad de transmisión [16].

- Espaciamiento entre canales: En sistemas WDM, cada uno de los láseres asociados a una longitud de onda central, representan cada uno de los canales del sistema. El espacio que existe entre las longitudes de onda central de canales adyacentes es conocida como el espaciamiento entre canales [17]. El valor de este espaciamiento podrá ser escogido del rango definido por la ITU en la recomendación G.694.1, el cual gracias a nuevas investigaciones, incluye valores de espaciamiento cada vez más pequeños, encontrando hoy un valor mínimo de 12.5GHz [7].

Este parámetro permitirá definir cuanta cantidad de información puede ser enviada desde el transmisor al receptor. Entre mayor sea la cantidad de información que se desea enviar, menor deberá ser el espaciamiento entre

³ Chirp, es el efecto donde la frecuencia portadora de un pulso varía con el tiempo, esto ocasiona ensanchamiento del ancho espectral del pulso y reduce el límite de dispersión.



canales; debe tenerse en cuenta que valores muy pequeños de espaciamiento impactarán los valores de los parámetros de diseño como la potencia de transmisión, distancia del enlace, entre otros.

- Velocidad de transmisión: Es un factor importante que estará sujeto a la capacidad de adquirir equipos adecuados para el manejo y control de efectos lineales y no lineales que se generan en el enlace por el uso de altas velocidades. Desarrollos han permitido la evolución de estas velocidades a valores de 2.5Gbps, 10Gbps, 40Gbps y 100Gbps [1].

B. Medio de transmisión

Este término hace referencia básicamente a la fibra óptica. Sin embargo, cuando la distancia del enlace es muy grande, elementos como los amplificadores deben considerarse para equilibrar las pérdidas presentadas en el enlace óptico.

- Fibra Óptica: Existen básicamente dos tipos de fibra, multimodo y monomodo [12]. Los sistemas WDM usan principalmente las fibras monomodo [5], las cuales son de diferentes tipos, destacándose la fibra estándar monomodo (SSMF, *Standard Single-Mode Fiber*) [17], como la define la recomendación ITU-T G.652 [22].
- Distancia del enlace: Indica la longitud del recorrido que habrá entre el transmisor y receptor y estará conformado por uno (1) o más tramos de fibra. La longitud máxima de cada tramo se definirá teniendo en cuenta las propiedades de la fibra, específicamente atenuación y dispersión [12].
- Atenuación: Es un factor que cambia linealmente con la distancia del enlace y afecta el balance de potencia. Para definir este parámetro, se debe tener en cuenta [12]:
 - Pérdidas de la fibra: Están dadas por el coeficiente de atenuación de la fibra (especificado por el fabricante) y la longitud del enlace.
 - Pérdidas por empalme (A_{EMP}): Es la atenuación que existe al unirse uno o varios tramos de fibra. Algunas veces se encuentran incluidas en las especificaciones de la fibra.



- Pérdidas por conector (A_{CON}): Son las pérdidas originadas en conexiones con los diferentes equipos del enlace (transmisor, receptor, entre otros)

La ecuación 1 considera todas las posibles pérdidas del enlace, así como el número de conectores y empalmes implementados y define la atenuación total del enlace.

$$Loss = A_{SSMF}L_{SSMF} + A_{CON}N_{CON} + A_{EMP}N_{EMP} \quad (1)$$

Donde $Loss$ son las pérdidas totales del enlace, $A_{SSMF}L_{SSMF}$ son las pérdidas y la longitud de la SSMF, $A_{CON}N_{CON}$ son la atenuación por conectores multiplicada por el número de conectores y $A_{EMP}N_{EMP}$ son la atenuación por empalmes multiplicada por el número de empalmes.

- Amplificador: Es un dispositivo electrónico encargado de amplificar la señal óptica; sirve como alternativa para recuperar la potencia de la señal perdida durante la transmisión. Comúnmente, la amplificación puede ser efectuada por una Fibra Amplificadora Dopada de Erbio (EDFA, *Erbium-Doped Fiber Amplifier*), un Amplificador Óptico Raman, o un Amplificador Óptico Semiconductor (SOA, *Semiconductor Optical Amplifier*) [23], [17].

Los amplificadores SOA han ganado popularidad gracias a su configuración en modo Booster⁴, a pesar de ello sufren de alta figura de ruido y estrecho ancho de banda, por lo que no son muy utilizados. Los amplificadores Raman se usan cuando se requiere amplificación adicional sin que se adicione ruido representativo al enlace. Finalmente, los EDFA son los más comunes y manejan la mejor relación costo-eficiencia [17].

- EDFA: Es un amplificador unidireccional usado cuando se requiere la amplificación de una o más longitudes de onda [17]. Permite alcanzar ganancias de hasta 50dB, con potencias de bombeo moderadas y la zona espectral en la que se realiza la amplificación corresponde a la tercera ventana, principalmente en la banda C [24].

Estos amplificadores pueden ser configurados de tres maneras: la primera configuración es Booster, en la cual el EDFA se ubica antes de la fibra de transmisión; la segunda configuración es Inline, en la cual el amplificador se usa entre largos span de fibra óptica y la tercera es en Pre-amplificación,

⁴ Modo Booster, el amplificador se ubica entre el transmisor y la fibra óptica.

donde el EDFA se sitúa después de la fibra de transmisión. Estas configuraciones se observan en la figura 1.4.

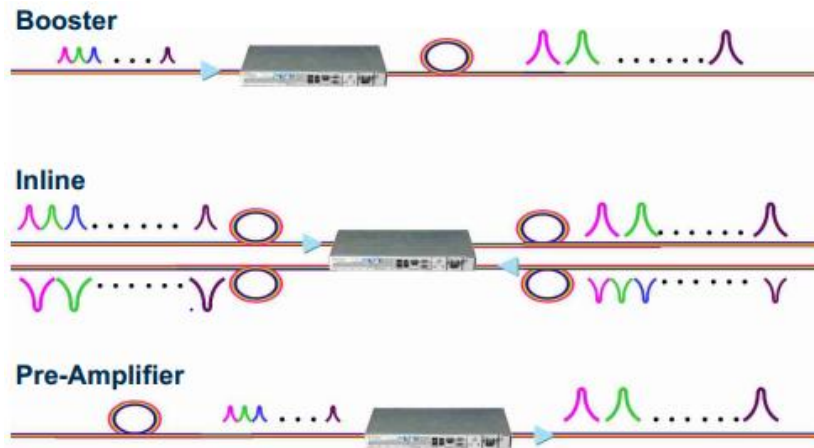


Figura 1.4 Configuraciones Booster, Inline y Pre-amplificación del amplificador EDFA [25].

Aunque son el tipo más común de amplificador, presentan una gran desventaja y es el ruido que adiciona al enlace. En enlaces de larga distancia que utilicen varios amplificadores EDFA, el ruido acumulado puede degradar la Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR, *Optical Signal-to-Noise Ratio*) [17].

- Raman: Se utilizan en aplicaciones específicas al ser más costosos y tener menor ganancia que los amplificadores EDFA. Sin embargo, presenta varias ventajas sobre los EDFA tales como: Introduce muy poco ruido al enlace y puede amplificar en cualquier banda, no solo en la banda C como los EDFA [17].

C. Receptor

El módulo receptor es el encargado de realizar la recuperación de la señal original, convirtiendo la señal de luz de entrada en una señal eléctrica. El receptor realiza este proceso mediante un semiconductor llamado fotodetector. Por otro lado el rendimiento del receptor está caracterizado por la medida del parámetro de desempeño BER en función de la potencia óptica en recepción. A continuación se presentan las características de los fotodetectores y el balance de potencia.



- Fotodetectores: En sistemas con fibra óptica se utilizan dos tipos. Los fotodiodo tipo PIN que se caracterizan por su fácil fabricación, bajo ruido y estabilidad frente a la temperatura; y los fotodiodos Avalancha (APD, *Avalanche PhotoDiodes*) los cuales son más rápidos y son altamente sensibles a la detección de luz modulada del láser transmisor. En los enlaces de cortas distancias comúnmente se utilizan los fotodiodos PIN debido a su baja sensibilidad a la temperatura y menor costo que los APD; estos últimos se utilizan sobre enlaces de largas distancias donde la potencia de la señal es muy débil y se requiere alta sensibilidad.
- Balance de Potencia: Basado en la potencia de transmisión (P_{TX}) y las pérdidas del enlace ($Loss$); define el mínimo nivel de potencia promedio o sensibilidad del receptor (P_{RX}) que debe tener una longitud de onda para poder ser percibida y recuperada por el receptor. La sensibilidad de un receptor es calculada a partir de la ecuación 2 [23], [12].

$$P_{RX} = P_{TX} + Loss \quad (2)$$

Adicional a los componentes y parámetros descritos anteriormente, en el diseño de sistemas WDM metropolitanas se considera también, otros parámetros de desempeño.

Para el análisis de desempeño de la calidad del enlace de transmisión de los sistemas WDM, existen diversas técnicas y parámetros a ser considerados, como por ejemplo la Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*), el factor Q y diagrama del ojo, entre otros. A continuación se realiza una descripción de estos parámetros de monitoreo óptico, los cuales se consideran en el desarrollo de este trabajo de grado [26]:

- BER: Este es el parámetro más importante utilizado en comunicaciones ópticas para medir el desempeño del sistema, que representa el número esperado de bits errados respecto a los transmitidos medido en recepción. Según la ITU-T para los sistemas de comunicaciones en general, el valor usual de la BER se encuentra alrededor de 10^{-9} . La BER se aumenta por el ruido, por la dispersión y los efectos no lineales. Degradaciones que es posible contrarrestar con el uso de una mayor potencia de transmisión óptica, reduciendo las pérdidas de fibra, empleando amplificadores de fibra y / o compensación de la dispersión en el enlace.



- Factor Q: Se define como la Relación Señal a Ruido Eléctrica en la entrada de un circuito de decisión de un receptor de señal digital. Sirve como una alternativa al BER para medir el desempeño del sistema. El factor Q se mide en dB; un valor aceptable para cualquier sistema de comunicaciones es de 6dB.
- Diagrama del Ojo: El uso del diagrama del ojo permite el análisis de las formas de onda de los pulsos que se propagan en el canal de transmisión y del cual se pueden deducir parámetros de medición como la BER y el factor Q. Así mismo, muestra en un rango de tiempo la superposición de las distintas combinaciones de posibles unos y ceros. El diagrama de ojo permite observar parámetros que determinan la calidad de la señal, donde se identifican dos tipos de cruces: cruce de tiempo, en el cual se produce la apertura y cierre del ojo, y cruce de amplitud el cual consiste en el nivel de voltaje que produce la apertura y cierre del ojo definiéndose en un periodo de bit.

1.2 Efectos lineales y no lineales

Existen diversos efectos que intervienen negativamente en el desempeño de los sistemas de comunicaciones ópticas, limitando principalmente la longitud y velocidad de los enlaces, estos son los efectos lineales y no lineales presentes en la fibra.

1.2.1 Efectos lineales

Dentro de los efectos lineales se encuentran las pérdidas o atenuación y la dispersión. Esta última se mide en ps/nm/Km y está relacionada con el ensanchamiento del pulso al propagarse por la fibra. Existen dos tipos de dispersión: la Dispersión Cromática (CD, *Chromatic Dispersion*) que causa un ensanchamiento de los pulsos según la longitud de onda; y la Dispersión Modal (PMD, *Polarization Mode Dispersion*) que produce un ensanchamiento de los pulsos según la polarización. A continuación se dará una breve descripción de estos efectos [20].

- **Dispersión Cromática [2], [20], [27], [28]:**

Se denomina así el efecto donde las componentes de la señal se transmiten a diferentes velocidades en la fibra, llegando estas a diferentes tiempos al receptor, provocando un ensanchamiento de los pulsos, si este es excesivo se manifestará en la superposición de los pulsos y errores en la codificación, este efecto degrada considerablemente los sistemas de alta velocidad. Una red que



transmite a 10 Gbps es 16 veces más tolerante a la dispersión cromática que una que transmite a 40 Gbps. De esta manera este efecto se convierte en uno de los más importantes para las redes de alta capacidad y altas tasas de bits.

En comunicaciones ópticas la dispersión cromática limita la tasa de transmisión máxima del sistema, como lo indica la ecuación 3.

$$BR < \frac{1}{4\Delta t} \quad (3)$$

Donde BR es la tasa de transmisión y Δt es la máxima dispersión cromática permitida, calculada a partir de la ecuación 4.

$$\Delta t = D(\lambda)L\Delta\lambda \quad (4)$$

Donde $D(\lambda)$ es el parámetro de dispersión cromática con unidades $ps/(nm/Km)$, L es la longitud de la fibra en Km y $\Delta\lambda$ es el ancho espectral de la fuente de luz en nm.

La dispersión cromática es dependiente de la longitud de onda, a mayor longitud de onda, mayor es el parámetro de dispersión, esto se puede notar en la ecuación 5, la cual permite calcular el parámetro de la dispersión cromática para una fibra óptica monomodo:

$$D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] \frac{ps}{nm-Km} \quad (5)$$

Siendo λ la longitud de onda de operación en nm, λ_0 la longitud de onda cuando $D(\lambda) = 0$ y S_0 es la pendiente de dispersión cromática para λ_0 , estos parámetros son dados por los fabricantes.

La dispersión cromática se da por dos razones, la primera es por el material utilizado para construir las fibras, denominada dispersión de material, este es dependiente de la frecuencia debido a que las diferentes componentes de frecuencia viajan a diferentes velocidades sobre el silicio. A pesar de que esta es la principal componente para que se produzca la dispersión cromática, existe una segunda componente, que es la dispersión por guía de onda, que se debe a imperfecciones en la relación del núcleo y a la longitud de onda de la luz que se transmite.

Los pulsos que se propagan sobre la fibra óptica no se conservan intactos debido a la dispersión cromática. El parámetro que rige la forma del pulso en el

trayecto es la segunda derivada de la constante de propagación β descrita por la ecuación 6.

$$\beta_2 = \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \quad (6)$$

β_2 es el parámetro de Dispersión de Velocidad de Grupo (GVD, *Group Velocity Dispersion*) o CD. Este define dos regiones de funcionamiento dependiendo del signo de la CD, si $D < 0$, entonces $\beta_2 > 0$, y se trataría de *dispersión normal*, donde las componentes de baja frecuencia viajan más rápido que las componentes de alta frecuencia; si $\beta_2 < 0$, se presenta *dispersión anómala*. La mayoría de las fibras ópticas que se emplean en los sistemas de comunicación trabajan a 1550nm, por lo que se ven más afectadas por la dispersión anómala.

Para la compensación de este efecto, en la práctica los sistemas de alta capacidad emplean Módulos Compensadores de Dispersión (DCM, *Dispersion Compensating Module*) constituidos por DCFs, que permite cancelar el efecto de la dispersión acumulada del enlace óptico.

- **Dispersión modal (PMD, *Polarization Modal Dispersion*) [29], [30], [31]:**

Ocurre cuando las componentes ortogonales de polarización, viajan a distintas velocidades de grupo, en consecuencia el receptor puede percibir la llegada de los modos en diferentes tiempos, provocando así, ensanchamiento y distorsión de los pulsos (figura 1.5). Esta diferencia de retardo entre los modos de polarización se denomina Retardo Diferencial de Grupo (DGD, *Differential Group Delay*). Esta variación de la velocidad de grupo se produce por la birrefringencia de la fibra, debida a la pérdida de simetría en el índice de refracción del núcleo de la misma debido a cambios moleculares del material.

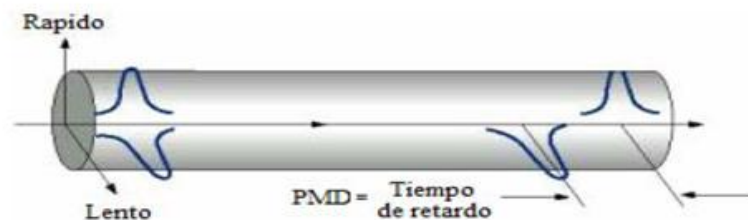


Figura 1.5 Dispersión modal [32].

Algunos factores que contribuyen a la PMD son condiciones ambientales, la tasa de bit, imperfecciones de la fibra, y la pérdida de la simetría circular de la



fibra óptica, esto causado por esfuerzos en el proceso de fabricación e instalación, contracción y dilatación debido a cambios de temperatura, tensiones, curvaturas, y demás.

La PMD tiene su mayor impacto cuando aumenta la velocidad de transmisión y la distancia, ya que distorsiona mucho más la señal enviada, siendo más evidente en sistemas con velocidades mayores a 10 Gbps.

1.2.2 Efectos no lineales

Los efectos no lineales afectan usualmente los sistemas modernos de comunicaciones, que trabajan principalmente a velocidades de transmisión por encima de los 10 Gbps y a altas potencias de transmisión. Algunos efectos no lineales causados por la dependencia existente entre el índice de refracción y la intensidad de campo aplicado son: Modulación de Fase Inducida (SPM, *Self Phase Modulation*), Modulación de Fase Cruzada (XPM, *Cross Phase Modulation*) y la Mezcla de Cuarta Onda (FWM, *Four Wave Mixing*). A continuación se realiza una breve descripción de cada uno de estos efectos [17] [33]:

- SPM: Consiste en un desplazamiento de fase el cual se presenta cuando se aplica una alta potencia a la señal transmitida por la fibra óptica, esto debido a que el índice de refracción de la fibra tiene un componente que depende de la intensidad de la señal, el cual induce un desplazamiento de fase que es proporcional a la intensidad del pulso, lo que produce un pulso chirp y cambia los efectos de la dispersión cromática, es por esto que en los sistemas con altas potencias de transmisión los efectos del SPM son más pronunciados.
- XPM: Es similar a SPM, consiste en un desplazamiento de fase, con la diferencia de que se genera cuando dos o más canales ópticos con diferentes frecuencias centrales se transmiten simultáneamente por una misma fibra óptica, usando la técnica de WDM, debido a que la interacción y la intensidad de los pulsos, provoca un cambio en el índice de refracción de los mismos.
- FWM: Consiste en la generación de nuevos componentes de interferencia sobre la señal óptica, cuando dos o más canales WDM se mezclan al propagarse en una fibra debido a la dependencia que existe entre el índice de refracción y la potencia de transmisión. Este efecto no lineal depende de la potencia de la señal, de la dispersión y del espaciamiento de los canales WDM, ya que entre



mayor es el número de canales transmitidos, las componentes creadas por FWM incrementan de forma casi exponencial.

También existen los efectos de dispersión en la fibra: Dispersión Estimulada de Raman (SRS, *Stimulated Raman Scattering*) y Dispersión Estimulada de Brillouin (SBS, *Stimulated Brillouin Scattering*) [27] [2]:

- SRS: Es un efecto de banda ancha el cual genera transferencia de potencia de una de señal de mayor frecuencia a la de menor frecuencia. El límite de potencia debido a SRS, es el nivel crítico en el cual la potencia incidente y la potencia dispersada son iguales, este está dado por la ecuación (7).

$$P_{\text{Limite}}(\text{SRS}) \approx \frac{16A_e}{g_R L_{ef}} \quad (7)$$

Donde, A_e es el área efectiva de la fibra, L_{ef} es la longitud efectiva de la fibra y g_R la ganancia de Raman, este parámetro depende de la composición del núcleo de la fibra.

- SBS: El origen de este efecto es similar al del SRS, aunque se puede presentar a menores niveles de potencia. Ese efecto no lineal al igual que la SRS se presenta por la generación de una onda llamada onda de Stokes, la cual se propaga en dirección opuesta a la dirección de propagación de la onda incidente y tiene una frecuencia menor a la de la luz incidente.

Finalmente cabe resaltar que los efectos no lineales que más afectan las comunicaciones ópticas son SPM, XPM y FWM, ya que generan mayores degradaciones en las señales ópticas, en comparación con SBS y SRS [34].

La Tabla 1.2 sintetiza la relación entre los parámetros generales a considerar en el diseño de un sistema WDM, valores de los mismos y efectos lineales y no lineales que los impactan.



Tabla 1.2 Parámetros generales de diseño de un sistema DWDM.

PRINCIPALES PARÁMETROS DE DISEÑO	ALGUNOS VALORES TÍPICOS	EFFECTOS LINEALES Y NO LINEALES QUE IMPACTAN	REFERENCIA
PARÁMETROS DEL TRANSMISOR			
Espaciamiento entre Canales (nm)	0.2 (25 Ghz) 0.4 (50 Ghz) 0.8 (100 GHz) 1.6 (200 Ghz) 3.2 (400 Ghz)	XPM, SPM, FWM	[3], [35],[19], [36],[37]
Bandas Utilizadas (nm)	C, L (1310 y 1550)	PMD	[23],[38], [36]
Canales por Fibra	2 – 160	XPM, FWM	[35],[38], [36]
Velocidad de Transmisión (Gbps)	2.5, 10, 40, 100	XPM, SPM, FWM, Dispersión cromática	[38]
Potencia de transmisión (dBm)	0 – 7	XPM, SPM, FWM	[15]
Tipo de fuente óptica	Láser de inyección diodos láser		[2],[23]
Formato de modulación	RZ, NRZ, OOK, CS-RZ, PSK y BPSK, PSBT, DPSK, QPSK, DQPSK	Atenuación, Dispersión cromática, sensibilidad a las no linealidades	[36]
Tipo de modulación	Directa o indirecta (EAM, MZI)		[23]
PARÁMETROS DEL MEDIO DE TRANSMISIÓN			
Distancias del enlace (Km)	hasta 600 (DWDM metro)	PMD	[36]
Atenuación (para 1550nm; dB/Km)	0.275	Efectos lineales	[23], [24]
	0,5 - 0.8 (otras fibras)		
Dispersión de la fibra (1550nm; ps/nm/Km)	16 (SSMF)	XPM, FWM, SPM	[23], [20], [37]
	(-)0.33 - 4 (otras fibras)		[8], [39], [40], [41]
Amplificador	EDFA, Raman, SOA		[2], [36]
Potencia del EDFA (dBm)	0.8, 10, 12		[23], [24]



Ganancia Amplificador EDFA (dBm)	15 y 50		[23]
PARÁMETROS DEL RECEPTOR			
Sensibilidad del receptor (dBm)	(-)7 – (-)28		[23]
BER	10^{-9}		[23]
Tipo de Detección	Directa (incoherente) Indirecta (Coherente)		[2], [36]

1.3 Fibras Compensadoras de Dispersión

En los sistemas de comunicaciones, incluidos los ópticos, la atenuación es un factor limitante en la transmisión de señales, en este caso, se utilizan amplificadores EDFA que reducen este fenómeno.

No obstante, la implementación de altas velocidades de transmisión en los sistemas ópticos y tendidos de fibra de mayor alcance, se han visto limitados por la CD. Para combatir esta limitación, las Fibras Compensadoras de Dispersión (DCF's, *Dispersion Compensating Fibers*) se han desarrollado ampliamente en los enlaces ópticos modernos [42].

Físicamente las DCF's o DCM, son carretes de fibra ubicados en cajas metálicas con conectores empalmados en cada uno de sus extremos. Estas cajas se ubican normalmente en racks, razón por la cual su tamaño se diseña para satisfacer las necesidades de espacio del usuario final [2].

La DCF presenta una alta dispersión negativa (anómala) con valores que oscilan entre -100 y -200 ps/nm/Km [43], lo que produce una pendiente negativa con valores nominales diez veces más grandes, permitiendo compensar la dispersión positiva de la fibra de transmisión en las bandas C y L.

A pesar de compensar de manera adecuada la CD, la DCF tiene una atenuación tres veces mayor que una fibra estándar, lo cual degrada el enlace [44]. Para contrarrestar esto, se hace necesario aumentar el nivel de potencia de la señal, ya sea con el uso de amplificadores o desde la fuente óptica.

Aunque las DCF's son el tipo de compensador más utilizado en enlaces ópticos, existen otros tipos de compensadores. Las rejillas compensadoras de dispersión, son espejos selectivos de longitud de onda que se encuentran al interior de una



fibra monomodo, pero debido al rizado causado por la desviación de altas frecuencias y el estrecho rango de longitudes de onda sobre las que opera, son un tipo de compensador poco utilizado. Existe otro tipo, las fibras de alto orden; son fibras basadas en gestores de dispersión caracterizadas por una dispersión nominal de -270 ps/nm/Km en la tercera ventana. Estas fibras pueden ser usadas para compensar la dispersión y la pendiente de dispersión en toda la banda C y L, para transmisiones DWDM Long Haul diseñadas con fibras monomodo con dispersión desplazada distinta de cero (NZDSF, *Non Zero Dispersion-shifted Fiber*) [42], [45], [46].

Si en los enlaces ópticos instalados sobre fibra óptica monomodo se aumenta la velocidad de transmisión a 10Gb/s o superior, es necesario hacer compensación de dispersión, y un camino fácil para esto es hacer uso de módulos de compensación de dispersión. Estos módulos pueden trabajar con rejillas compensadoras para bandas estrechas de transmisión o con DCF para banda ancha. En este trabajo de grado, como se ha mencionado, se enfocara el estudio en el método de compensación por DCF para analizar su impacto en un sistema WDM.

1.3.1 Propiedades de la DCF

Con el desarrollo de sistemas de comunicación por fibra óptica de altas velocidades de transmisión, han aparecido fuertes demandas de DCF's que sean capaces de disminuir las pérdidas de inserción, las perdidas por empalme, suprimir la dispersión residual en la banda de operación, tener tamaños pequeños y costos reducidos [42], [47], [48].

Con base en lo anterior, las propiedades más relevantes de la DCF son: La atenuación, el coeficiente de dispersión, la figura de mérito y el área efectiva. Dichas propiedades se describen a continuación.

A. Atenuación

La ecuación 1 definió la atenuación total de un enlace sin DCF. Si se tienen en cuenta las pérdidas de la DCF y se considera que las pérdidas por empalmes y conectores están inmersas en A_{SSMF} , dicha ecuación se transforma en la ecuación 8, la cual representa la atenuación total del enlace con DCF.

$$LOSS_T = A_{SSMF}L_{SSMF} + A_{DCF}L_{DCF} \quad (8)$$



Aunque las DCF's son necesarias para el control de dispersión, simultáneamente reducen el rendimiento del sistema al introducir pérdidas adicionales, $A_{DCF}L_{DCF}$, que incrementan la necesidad de amplificadores cuyo uso degrada la SNR y adiciona costo al enlace. Por lo anterior, reducir las Pérdidas por Inserción (IL, *Insertion Loss*) es algo importante.

Las IL's son la suma de las pérdidas totales de la DCF, las pérdidas por empalme entre la DCF y la Fibra, y las pérdidas conector-conector. La ecuación 9, define las IL's de un módulo DCF.

$$IL_{DCF} = A_{DCF}L_{DCF} + \alpha_{empalme} + \alpha_{conector} \quad (9)$$

Donde $\alpha_{empalme}$, $\alpha_{conector}$ son la atenuación por empalme y por conector, respectivamente.

Una característica crítica de la DCF es ser capaz de unirse a una SSMF con bajas pérdidas. Típicamente, la DCF tiene un diámetro de aproximadamente 5 μm , mientras que la fibra mono-modo tiene un diámetro aproximado de 10.5 μm , la gran diferencia genera pérdidas intrínsecas de empalme de más o menos 2.2 dB. Sin embargo, optimizando los parámetros de empalme es posible generar pérdidas entre 0.7 – 0.8 dB [47].

Las IL's típicas de una DCF convencional están alrededor de 6dB para compensar una dispersión acumulada en 80Km de fibra monomodo [42], [48], [49].

B. Coeficiente de Dispersión

Como ha sido mencionado a lo largo del capítulo, la dispersión juega un papel importante dentro de los sistemas ópticos, al ser un efecto lineal de gran impacto. La ecuación 10, describe la dispersión que sufre un pulso en función de L_{SSMF} , D_{SSMF} , D_{DCF} y $(\Delta(\lambda))$.

$$\Delta t = L_{SSMF}D_{SSMF}(\lambda)\Delta(\lambda) + L_{DCF}D_{DCF}(\lambda)\Delta(\lambda) \quad (10)$$

Donde D_{SSMF} y D_{DCF} son los coeficientes de dispersión de la fibra de transmisión y la DCF y L_{SSMF} y L_{DCF} son las longitudes de la fibra y la DCF respectivamente; $\Delta(\lambda)$, es el ancho espectral del pulso y Δt es la máxima dispersión cromática permitida.

El rendimiento de una DCF sobre un amplio rango de longitudes de onda puede evaluarse usando la dispersión residual, la cual es una medida de la dispersión después del módulo de compensación en el receptor. Sin embargo, debido a los efectos no lineales y posibles chirp en el transmisor, eliminar completamente la



dispersión no es posible. Para cada uno de los tramos de fibra, la ecuación 11 expresa la dispersión residual.

$$D_{RES} = D_{TF}L_{TF} + D_{DCF}L_{DCF} \quad (11)$$

Si se necesitara una $D_{RES} = 0$, la longitud de la DCF, puede calcularse a partir de la ecuación 5 y de valores conocidos de L_{TF} , D_{TF} y D_{DCF} .

Dispersiones típicas de un número de fibras de transmisión usadas comúnmente en la tercera ventana, se enuncian y resumen en la tabla 1.3.

Tabla 1.3 Dispersión de fibras de transmisión alrededor de 1550nm [49].

Tipo de Fibra		Valor de Dispersión [ps/nm/Km]
Fibra Óptica Monomodo Estándar (SSMF) ITU: G.652		16.5
Fibra Óptica Monomodo de Dispersión No Cero Desplazada (NZDF) ITU: G.655	Fibra TrueWave® REACH	7.1
	Fibra TeraLight	8
	Fibra TrueWave® RS	4.5
	Fibra de gran área efectiva mejorada (ELEAF, <i>Enhanced Large Effective Area Fiber</i>)	4.2
Fibra Óptica Monomodo de Dispersión Desplazada (DSF) (a 1590 nm) ITU: G.653		2.8

De las fibras mencionadas en la tabla 1.3, la SSMF tiene la mayor dispersión, y por tal motivo necesita mayor compensación de dispersión. La fibra NZDSF fue desarrollada con el fin de reducir dicha necesidad, pero con el incremento de las velocidades de transmisión en el sistema, el control de la dispersión se convirtió en algo muy importante, incluso las bajas dispersiones de las fibras NZDSF necesitan compensación [49].

C. Figura de Mérito [47].

Como se mencionó, la mayor desventaja de la DCF es incrementar la atenuación del enlace. Para manejar este efecto, se hace uso de la Figura de Merito (FOM, *Figure of Merit*), la cual define la relación que existe entre la dispersión y la atenuación de la DCF y se describe en la ecuación 12.

$$FOM = -\frac{D_{DCF}}{\alpha_{DCF}} \text{ o } \frac{|D_{DCF}|}{|\alpha_{DCF}|} \quad (12)$$



La relación entre la FOM y la $LOSS_T$, esta definida en la ecuación 13. Esta ecuación se obtiene de la ecuación 5, considerando $D_{RES} = 0$, y de la ecuación 8.

$$LOSS_T = \left(\alpha_{TF} + \frac{D_{TF}}{FOM} \right) L_{TF} \quad (13)$$

D. Área Efectiva (A_{EF})

Es una propiedad de la DCF, que determina que tan estrecho se confina el haz de luz en el núcleo de la fibra, y se define como lo muestra la ecuación 14.

$$A_{EF} = kw^2 \quad (14)$$

Donde k es una constante, y w es el diámetro del campo modal.

La definición de un área efectiva específica está limitada por la sensibilidad de curvatura de la fibra. Para lograr una fibra con buenas características de curvatura, el área efectiva debe ser reducida; el resultado de este proceso es una DCF con $A_{EF} = 20\mu\text{m}^2$ [21].

La literatura [21], [50] menciona que a valores pequeños de área efectiva, los efectos no lineales pueden aumentar; sin embargo efectos no lineales como SPM, XPM y FWM se deben principalmente a la potencia de transmisión que es implementada en los canales del sistema, y de manera adicional, el segundo y tercero efecto se deben a la alta dispersión de la fibra [50].

1.3.2 Técnicas de compensación ópticas para la CD

Las técnicas de compensación ópticas dependen del lugar donde se ubique la DCF en el trayecto principal de fibra óptica, clasificándose de la siguiente manera: Técnica de pre compensación, pos compensación y compensación simétrica de la dispersión. Para los sistemas DWDM de alta capacidad y altas velocidades, la fibra más usada es la SSMF, la cual se puede instalar junto con las DCF's, debido a que esta última con su alta dispersión negativa permite compensar la dispersión positiva de la SSMF [51].

- **Técnica de Pre-compensación Óptica**

En la técnica de pre-compensación óptica, el tramo de DCF se coloca antes del tramo de la fibra óptica de transmisión. El módulo DCF introduce al enlace una gran dispersión negativa al inicio del trayecto, la cual permite compensar la dispersión positiva de la SSMF (fibra óptica principal) que se va acumulando a

lo largo del tramo generando así al final del trayecto una dispersión residual considerablemente pequeña, como se observa en la figura 1.6 [52], [53].

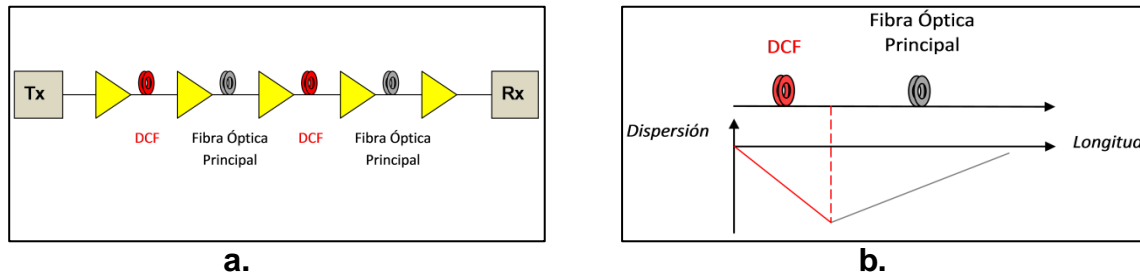


Figura 1.6 (a) Configuración y (b) Mapa de dispersión de la técnica de pre-compensación óptica para la CD.

- **Técnica de post-compensación óptica**

La técnica de post-compensación óptica, consiste en colocar un tramo de DCF después del tramo de la fibra óptica de transmisión, al final de dicho tramo la CD es máxima, en este punto se introduce la DCF, la cual contrarresta la CD acumulada por la fibra óptica, con su elevado índice de dispersión, permitiendo obtener en el receptor una dispersión residual significativamente reducida [53], como se observa en la figura 1.7 [51].

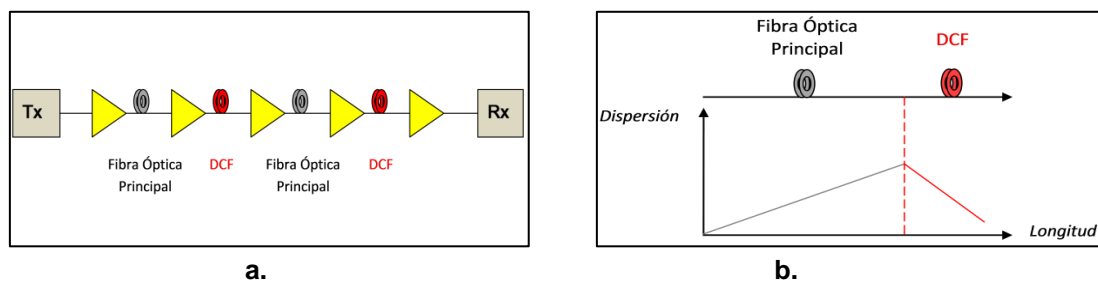


Figura 1.7 (a) Configuración y (b) Mapa de dispersión de la técnica de pre-compensación óptica para la CD.

- **Técnica de compensación simétrica**

La técnica de compensación simétrica consiste en colocar dos tramos de DCFs. El primer tramo de DCF se ubica después de la fibra óptica de transmisión y antes de la etapa de amplificación, el segundo tramo de DCF se coloca antes de la fibra óptica de transmisión y después de la etapa amplificadora.

Este esquema se caracteriza por presentar un mejor rendimiento en sistemas de altas velocidades comparado con los otros dos esquemas mencionados, adicionalmente, puede reducir los efectos de la fibra [42], [53], [54]. Como se observa en la figura 1.8 [51].

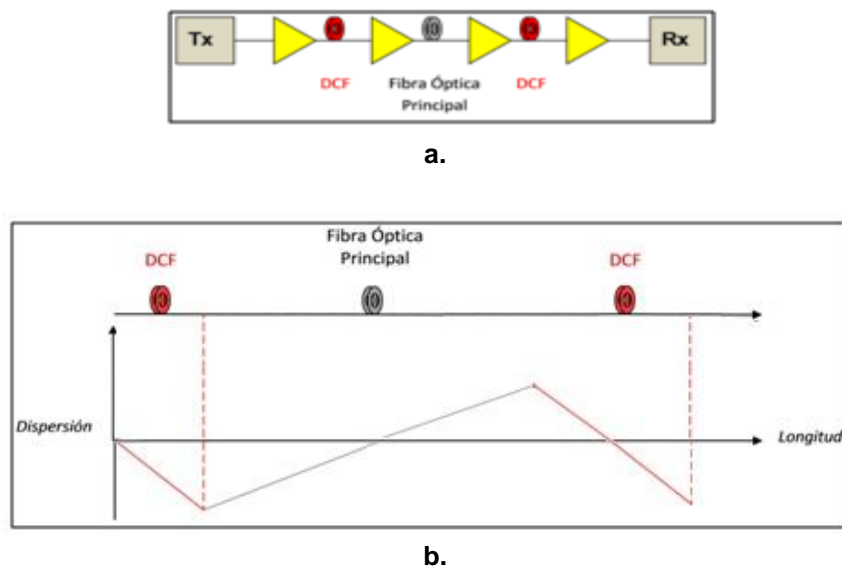


Figura 1.8 (a) Configuración y (b) Mapa de dispersión de la técnica de pre-compensación óptica para la CD.

En el desarrollo del presente trabajo se tendrá en cuenta la técnica de pos-compensación con el fin de reducir la BER y los aumentos de potencia ocasionados por el impacto de la compensación de dispersión [55].

Las tablas 1.4 y 1.5, resumen algunos de los parámetros de diseño, propiedades de las DCF, sus valores típicos, y los posibles efectos sobre el rendimiento del enlace óptico.

Un aspecto a tener en cuenta y, que no se evidenció en la bibliografía consultada, fue alguna descripción de los efectos lineales y no lineales, variables medidas que afectan la FOM, como se observan en la tabla 1.4.



Tabla 1.4 Parámetros de una DCF.

Principales Parámetros de una DCF	Algunos Valores Típicos	Efectos Lineales y No Lineales que Impactan	Variables Medidas	Consideraciones Generales	Referencia
Dispersión Negativa (ps/nm/Km)	(-)70 – (-)90	Dispersión Cromática Perdidas	Factor Q	16 Km DCF 80 Km SSMF Con Esquema de Post Compensación	[44], [42], [53], [28]
Atenuación (dB/Km)	0,4 - 0,7				[42], [46], [29], [53]
Dispersión Residual	0.1				[45]
FOM (ps/nm.dB)	200 - 300				[45]
Área Efectiva (μm^2)	82	FWM		Baja Área Efectiva Alta Potencia de Transmisión	[46], [47]

Tabla 1.5 Parámetros de diferentes tipos de DCF.

Principales parámetros de una DCF	Tipos DCF / Algunos Valores Típicos						Referencia
	Convencional *	Alta FOM *	Bajas Perdidas *	Estándar	Banda Ancha	Alta Pendiente	
Dispersión Negativa (ps/nm.Km)	-120	-250	-170	-100	-95	-100	*[48], [47]
Atenuación (dB/Km)	0.43	0.58	0.46	0.50	0.50	0.68	[56], [47]
Dispersión Residual	± 0.02	± 0.2	± 0.1	N/A	N/A	N/A	*[48]
FOM (ps/nm.dB)	280	430	370	200	190	150	[56], [47]
Pérdidas de Empalme (dB)	0.35	0.2	0.3	N/A	N/A	N/A	[56]



En conclusión, se tiene que:

La atenuación y dispersión de la SSMF son parámetros intrínsecos a la fibra, por esta razón son variables fijas. Además, se tienen en cuenta para definir los tipos de amplificadores a utilizar.

La velocidad de transmisión es un parámetro que impacta directamente la dispersión del enlace. En el presente trabajo de grado se establece una velocidad de trabajo de 10 Gb/s, dado que es la velocidad más comúnmente utilizada en los sistemas WDM a nivel nacional.

La potencia de transmisión en los sistemas de 10 Gbps y superiores se debe aumentar para lograr altas velocidades y un mayor alcance, pero a su vez las potencias elevadas excitan los efectos no lineales como son la XPM, FWM y la SPM convirtiéndose así en un factor determinante en la eficiencia de los sistemas de comunicaciones ópticas.

La recomendación ITU-T G.694.1 define los espaciamentos típicos entre canales de 0.4nm (50GHz), 0.8nm (100GHz) y 1.6nm (200GHz) para velocidades de 10 Gbps. Este parámetro ayuda a evitar la interferencia de canal adyacente y debe ser definido según el número de canales a implementar.

La longitud total del sistema se ve afectada por la dispersión que se acumula en el enlace a lo largo de la fibra de transmisión, según la longitud deseada del enlace se debe compensar la dispersión con técnicas de compensación como pre-compensación, pos-compensación o compensación simétrica con módulos DCM compuestos por DCF.

El índice de dispersión negativo de la DCF es uno de los parámetros más importantes ya que permite contrarrestar la dispersión total acumulada en el enlace por la fibra SSMF, este parámetro se puede variar para conseguir un desempeño adecuado del sistema.

La atenuación de la DCF, requiere un equilibrio entre la distancia del enlace y la potencia de transmisión para que el sistema cumpla con parámetros requeridos del sistema.

El área efectiva de la DCF no será tenida en cuenta para el estudio, debido a que la topología analizada es punto a punto, en la cual no se consideran pérdidas por curvaturas, y se adjudica la posible presencia de los efectos no lineales a la potencia de transmisión.



La FOM es una propiedad importante de la DCF, ya que establece un equilibrio en el desempeño de la DCF, al definir la relación entre las propiedades de atenuación y dispersión.

Una vez estudiada la teoría acerca de los sistemas WDM y la DCF, se han definido los principales parámetros de diseño y las principales propiedades de la DCF. En el siguiente capítulo se realizara el análisis del impacto de las propiedades mencionadas.



CAPÍTULO 2. SIMULACIÓN, PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se desarrolla el proceso de simulación que permitirá analizar el impacto que las principales propiedades de la DCF, tales como la atenuación y el coeficiente de dispersión, tienen sobre el diseño de un sistema WDM. Para ello se hace uso de la herramienta OptSim® de Rsoft y se sigue una metodología de simulación, que permite implementar y simular dos casos de estudio con los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-DPSK, en los que se realizan pruebas y el análisis correspondiente al comportamiento del sistema.

2.1 Herramienta de simulación

Existen diversas herramientas de simulación para sistemas de comunicaciones ópticas, sin embargo la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca cuenta con la licencia de la herramienta de simulación OptSim® de Rsoft, la cual permite el diseño y evaluación del desempeño de sistemas ópticos que incluyen modelos de componentes flexibles y algoritmos de simulación avanzados que proveen el mejor balance entre exactitud y tiempo. OptSim® puede ser utilizado para un amplio rango de aplicaciones, entre las cuales se pueden destacar: la optimización de los enlaces, análisis de pérdidas y efectos lineales y no lineales e investigación de nuevos esquemas de modulación, es por esto que será utilizada para llevar a cabo el desarrollo del presente trabajo de grado [36].

Esta herramienta trabaja en dos modos de simulación: modo bloque y modo muestra. La simulación en modo bloque es una técnica tradicional, en donde la señal de datos pasa entre componentes representando todo el tiempo de simulación en un bloque de datos, mientras que en el modo muestra un componente pasará una nueva muestra de datos a otro en cada paso de tiempo de la simulación, de tal forma que la señal de datos pasa entre componentes y representa una muestra única en cada instante de tiempo.

El modo muestra también provee 2 tipos de simulación: una Técnica de Propagación Espectral (SPT, *Spectral Propagation Technique*) donde las señales se propagan en la red teniendo en cuenta las pérdidas de los componentes y el ruido. Además es posible evaluar en cualquier punto de la red, los espectros, niveles de potencia y la relación señal a ruido óptica (OSNR) y la técnica de Ancho de Banda Variable de Simulación (VBS, *Variable Bandwidth Simulation*) que define un entorno donde las señales se propagan como muestras en el dominio del



tiempo sobre un ancho de banda variable y simula el rendimiento de los sistemas en las opciones "VBS Full" que tiene en cuenta todos los efectos de las fibras tanto lineales como no lineales, "VBS Loss Only Fiber" solo tiene en cuenta la atenuación de la fibra y "VBS Linear Fiber" que considera únicamente los efectos lineales.

Considerando lo anterior, para el desarrollo de este proyecto se utiliza el modo muestra, con la técnica VBS, ya que permitirá obtener los resultados de los diferentes parámetros a estudiar de manera conjunta.

2.2 Metodología de Simulación

Con el fin de analizar el impacto de las propiedades de la DCF en el diseño de un sistema WDM, se adapta de [57], [58] una metodología de simulación que permita a través de una serie de etapas o pasos, alcanzar los objetivos propuestos en el presente proyecto. Los pasos definidos para desarrollar metodológicamente el proceso de simulación y análisis son:

- Generación del escenario y casos de simulación.
- Identificación de los parámetros técnicos del escenario de simulación.
- Ejecución de la simulación.
- Análisis de los resultados de la simulación.

2.2.1 Generación del escenario y casos de simulación.

Para el análisis del impacto de las propiedades de una DCF en el diseño de un sistema WDM, se genera un escenario de simulación del cual se desprenden dos casos, en estos se implementan los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-DPSK. Para cada caso se estudia el comportamiento de la atenuación y el coeficiente de dispersión, propiedades de la DCF a considerar en el presente capítulo; cada una de estas, corresponde a una configuración. En cada caso de simulación las configuraciones se harán de manera incremental, es decir una vez que se desarrolla una de ellas, se establecen las mejores condiciones para dar paso a la siguiente, ver figura 2.1.

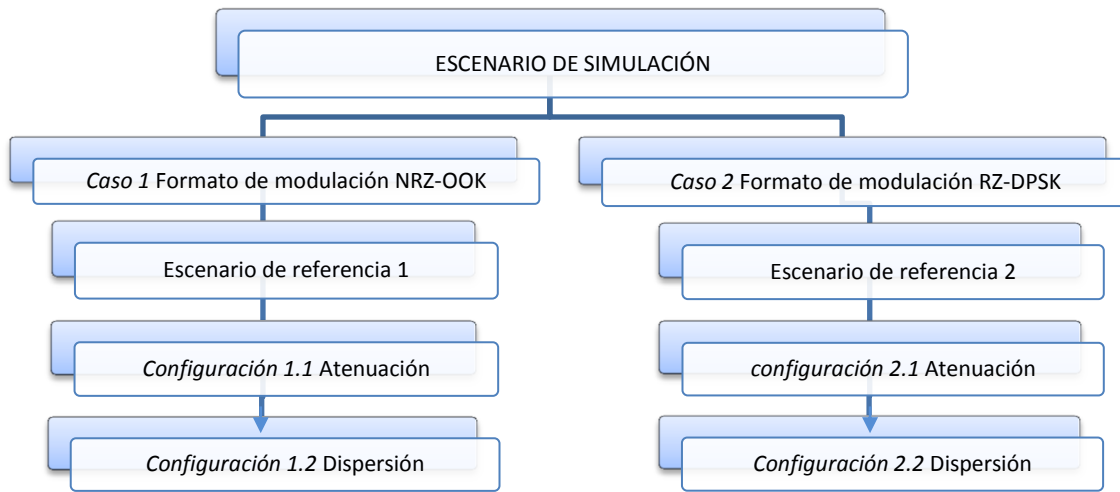


Figura 2.1 Escenario, casos de simulación y configuraciones a implementar.

Escenario de simulación: Está compuesto por tres elementos básicos: un transmisor, un medio de transmisión y un receptor. La conexión establecida entre transmisor y receptor, es punto a punto y tiene una velocidad de 10 Gbps. La figura 2.2 muestra el esquema/diagrama de referencia para la simulación descrita. Los componentes internos de cada uno de ellos han sido expuestos en el capítulo 1.

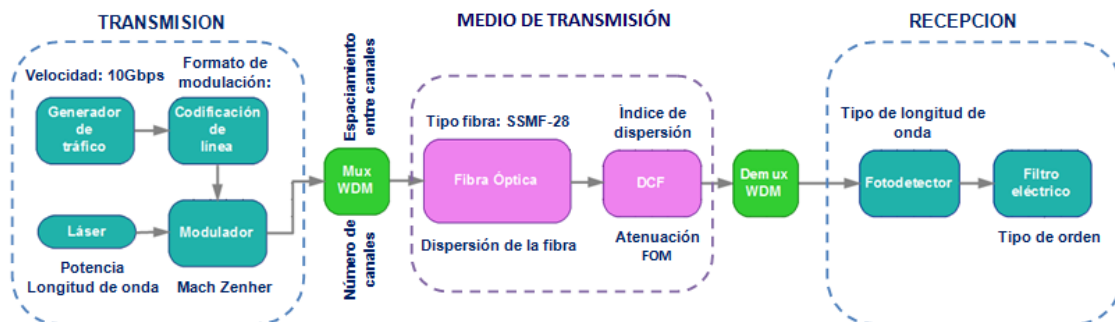


Figura 2.2 Escenario de simulación.

Casos de Simulación: Se definen dos casos de simulación, el caso 1 y caso 2, conformados respectivamente por los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-DPSK. El primero de ellos se selecciona por su simplicidad y bajo costo de implementación, además de ser uno de los más utilizados en redes ópticas; el segundo, por estar caracterizado por su robustez y amplia difusión en los sistemas



que trabajan a 10 Gbps. Estos casos se generan a partir del escenario de simulación, así que trabajan bajo las mismas condiciones iniciales (valores de parámetros y componentes). Para cada caso de simulación se han establecido dos configuraciones que serán implementadas sobre un escenario de referencia, como se describe a continuación:

- **Escenarios de referencia:** Se establece un escenario de referencia para cada caso de simulación, caracterizado por los parámetros descritos por el ítem 2.2.2. En cada caso se analiza inicialmente el comportamiento del sistema dependiendo del formato de modulación implementado al adicionar una DCF con valores estándar de atenuación y dispersión, buscando finalmente la distancia máxima del enlace bajo dichas condiciones.

- **Configuraciones:**
 - **Atenuación:** Esta configuración permite analizar el impacto de esta propiedad sobre un enlace que use la DCF. Para ello, se varía el valor de la atenuación de la DCF para diferentes valores de potencia; adicionalmente se implementa amplificación EDFA y RAMAN a fin de observar si es posible disminuir la potencia necesitada en la fuente óptica; luego se halla la distancia máxima del enlace y se establecen los valores de potencia de transmisión y atenuación de la DCF, que alcanzan los valores de los parámetros de BER y Factor Q especificados.

 - **Dispersión:** una vez definidas las mejores condiciones de la configuración de atenuación, se evalúa el comportamiento del sistema ante la variación del coeficiente de dispersión de la DCF. Se realizan pruebas con parámetros como la longitud de la fibra de transmisión y la DCF y el espaciamiento entre canales, finalmente se establece el mejor valor del coeficiente de dispersión y la distancia máxima del enlace.

2.2.2 Identificación de los parámetros técnicos del escenario de simulación.

Los escenarios de simulación se caracterizan de acuerdo a los parámetros principales de los sistemas WDM. Estos parámetros se definen a continuación:

1. Topología punto a punto para simplificar el esquema de la red WDM.

2. Tecnología WDM unidireccional.



3. Se utiliza la fibra SSMF-28 de Corning, una de las más utilizadas a nivel comercial en sistemas WDM y que cumple con lo estipulado en la recomendación ITU-T G.652 [22]. Esta fibra ha sido escogida ya que trabaja en la banda C, donde se presenta bajos coeficientes de atenuación.
4. Velocidad de transmisión a 10 Gb/s; velocidad a la que actualmente la mayoría de los operadores nacionales trabaja.
5. La potencia de transmisión será variable con el fin de poder determinar el impacto de los efectos lineales y no lineales. Los valores de potencia a trabajar están definidos inicialmente en un rango de 0 - 7dBm basados en valores típicos de algunos equipos comerciales y la tabla 1.3 del capítulo 1. Sin embargo, este rango de trabajo podría cambiar con el fin de observar con detalle el impacto de las variaciones de la DCF.
6. Se trabaja con los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-DPSK.
7. En el espaciamiento entre canales se tendrá en cuenta la recomendación ITU-T G.694.1 [7], en la que se indica las frecuencias centrales nominales, en THz; para sistemas WDM con espaciamientos de 25, 50 y 100 se definen de la siguiente manera:
 - Espaciamientos de canales de 25 GHz:
 $193,1 + n \times 0,025$, donde n es un entero positivo o negativo incluido el cero (0).
 - Espaciamientos de canales de 50 GHz:
 $193,1 + n \times 0,05$, donde n es un entero positivo o negativo incluido el cero (0).
 - Espaciamientos de canales de 100 GHz :
 $193,1 + n \times 0,1$, donde n es un entero positivo o negativo incluido el cero (0).
8. Los valores de las propiedades a variar de la DCF se definen según los rangos resumidos en la tabla 1.4 del capítulo 1 y los valores de algunos equipos comerciales y no comerciales, como se describe a continuación:



- Atenuación: 0.1 a 3.5 dB/Km.
- Coeficiente de dispersión: -17 a -333 ps/nm/Km.

9. Teniendo en cuenta el plan de frecuencia de la recomendación ITU-T G.694.1 y algunos equipos comerciales, se opta por trabajar en las siguientes longitudes de onda:

- Canal 1: 1533.46 nm
- Canal 2: 1532.68 nm
- Canal 3: 1531.89 nm
- Canal 4: 1531.11 nm

Después de revisar los parámetros principales de un sistema WDM, las propiedades de la DCF y los estándares de la ITU-T para sistemas WDM, se sintetiza en la tabla 2.1 los valores y/o rangos de trabajo de dichos parámetros y propiedades.

Tabla 2.1 Características, Parámetros y Propiedades más importantes para el escenario de simulación.

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
PARÁMETRO	VALORES
Tecnología de Red	WDM unidireccional
Velocidad del Sistema	10 Gb/s
Banda	Banda C (1530 - 1560 nm)
Ventana	Tercera ventana
Estándar Utilizado	G.652
Tipo de Fibra	Corning SSMF-28
Atenuación de la fibra SSMF-28 para 1550nm	0.235 dB/Km
Coeficiente de Dispersión 1550nm	17 ps/nm/Km
Espaciamiento de los canales WDM	25 Ghz (0.2 nm) 50 Ghz (0.4 nm), 100 GHz (0.8 nm)
Número de canales implementados	4 canales
CARACTERÍSTICAS DEL TRANSMISOR	
Formato de modulación	NRZ-OOK y RZ-DPSK
Tipo de modulación	Externa con Mach-Zenhder
Potencia de Tx del Láser	0 - 7dBm
Filtros ópticos en el Tx	Filtros Bessel
Frecuencias centrales	Según recomendación ITU-T



nominales	G.694.1 y equipos comerciales.
CARACTERÍSTICAS DEL RECEPTOR	
Sensibilidad del receptor	-25dBm
BER y Factor Q	10^{-15} y 17 dB
Filtros de Recepción ópticos	Filtro Bessel y Coseno Rizado
CARACTERÍSTICAS DE LA DCF	
Coefficiente de dispersión negativo	Entre -17 y -333 ps/nm/Km
Atenuación	Entre 0.1 y 3.5 dB

2.2.3 Ejecución de la simulación

Los escenarios descritos en la sección 2.2.1 se implementan en OptSim® de Rsoft, en modo muestra, con la opción VBS Full. El tiempo para cada simulación es de 70ns con un número de 128 muestras. Una vez termina el tiempo de simulación, la herramienta genera las gráficas del diagrama del ojo y los valores de los parámetros de desempeño; Factor Q y BER.

2.2.4 Análisis de los Resultados de la Simulación

A continuación se llevará a cabo el análisis de resultados obtenidos de los casos de simulación desarrollados, teniendo en cuenta la recomendación ITU-T G.652 y los parámetros OPM, donde se recomienda un BER de 10^{-9} para un rendimiento aceptable de un enlace, sin embargo para el desarrollo del trabajo de grado se ha definido un valor más exigente de 10^{-15} y el factor Q se ha establecido en un valor de 17dB.

2.2.4.1 Caso 1. Formato de Modulación NRZ-OOK

Se hace el análisis de un sistema WDM con cuatro longitudes de onda diferentes transmitidas sobre una única fibra (SSMF-28 de Corning), a una velocidad de 10Gbps, en el que se implementa el formato de modulación NRZ-OOK. En este caso se implementan las dos configuraciones descritas en el ítem 2.2.1, a fin de establecer el impacto que genera el uso y la variación de las propiedades de la DCF.

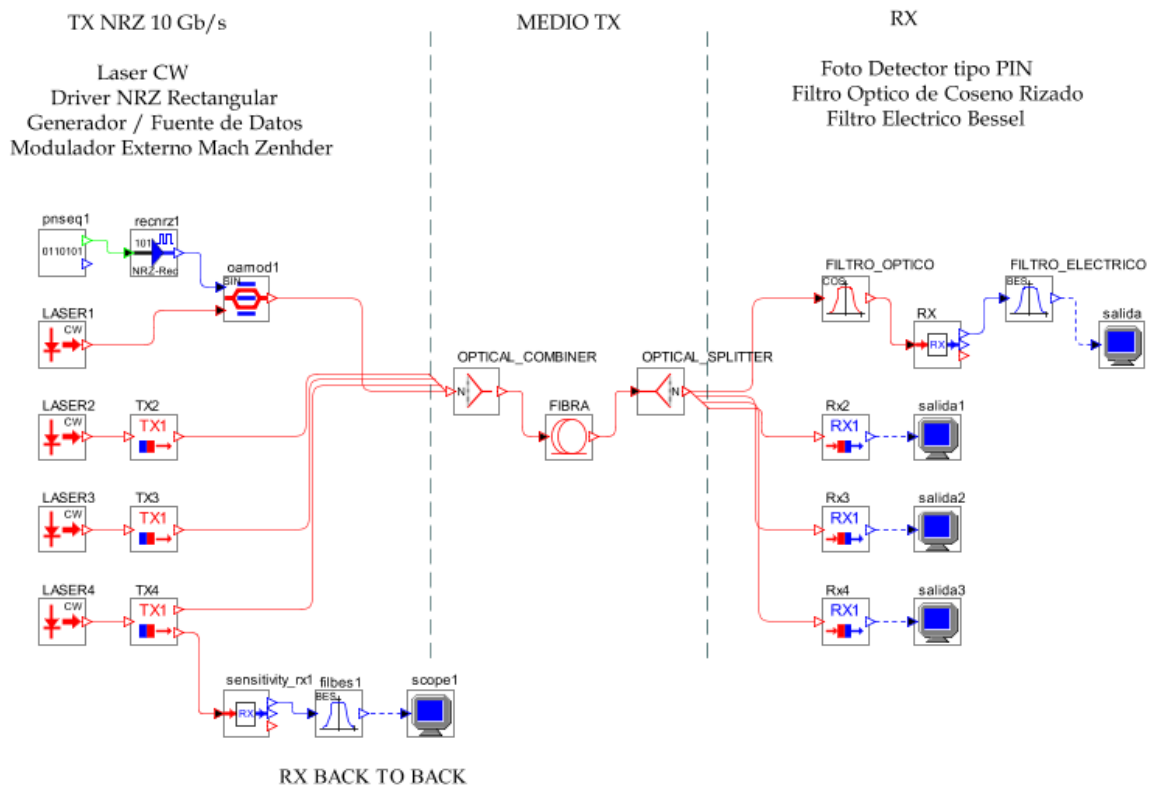


Figura 2.3 Escenario de simulación en OptSim® para el caso 1. Formato de Modulación NRZ-OOK.

La figura 2.3, muestra el escenario de simulación para el caso 1. Para implementar el formato NRZ-OOK, el transmisor y receptor están compuestos por:

- Transmisor: Un láser de onda continua lorentziano, un modulator externo Mach-Zenhder (MZM, *Mach-Zenhder Modulator*), un generador de datos, un driver NRZ rectangular, los cuales generan la señal NRZ-OOK.
- Receptor: Un filtro óptico coseno, un receptor tipo PIN y un filtro eléctrico Bessel.

Escenario de referencia 1: Se ajusta cada componente del sistema WDM, de acuerdo a los parámetros técnicos del escenario de simulación descritos en la sección 2.2.2 y la tabla 2.1.

Para llevar a cabo esta configuración, se definen tres pasos: en el primer paso, se realiza una recepción Back-to-Back⁵, la cual permite comprobar si la señal que se va a transmitir ha sido modulada de manera adecuada; en el segundo paso, se

⁵ Se entiende como una configuración en la cual el transmisor y el receptor están conectados directamente.



introduce la fibra de transmisión y se define la máxima distancia alcanzada por la misma para que cumpla el BER y factor Q definido; finalmente se analiza el impacto de la DCF al implementarla en el sistema.

En la recepción Back-to-Back, se ajustan principalmente los parámetros del transmisor y receptor y se conectan estos de manera directa. La figura 2.4 a y b, muestran el diagrama del ojo y el espectro óptico, de la señal modulada en NRZ-OOK, evidenciando un correcto proceso de modulación al no presentarse ninguna degradación

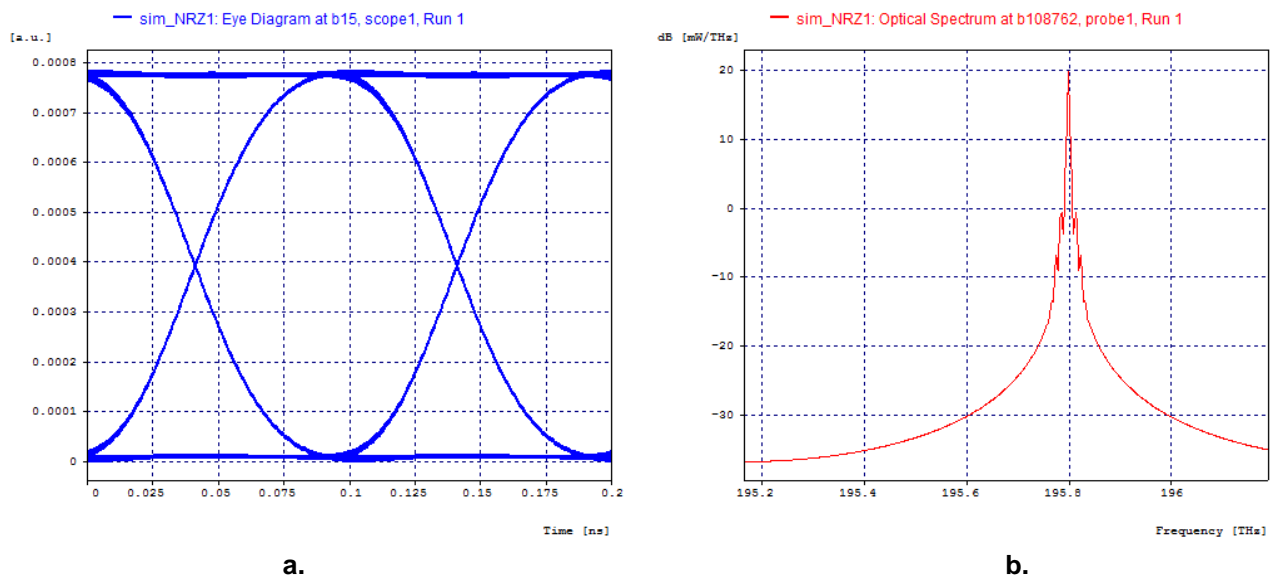


Figura 2.4 Diagrama del ojo (a) y Espectro óptico (b) de la señal NRZ-OOK en el receptor Back-to-Back.

Una vez obtenida la señal modulada correctamente, se procede a introducir la SSMF-28 de Corning y se define la distancia máxima del enlace que cumpla el BER y el factor Q establecido.

Luego de ejecutar la simulación, se obtienen los siguientes resultados:

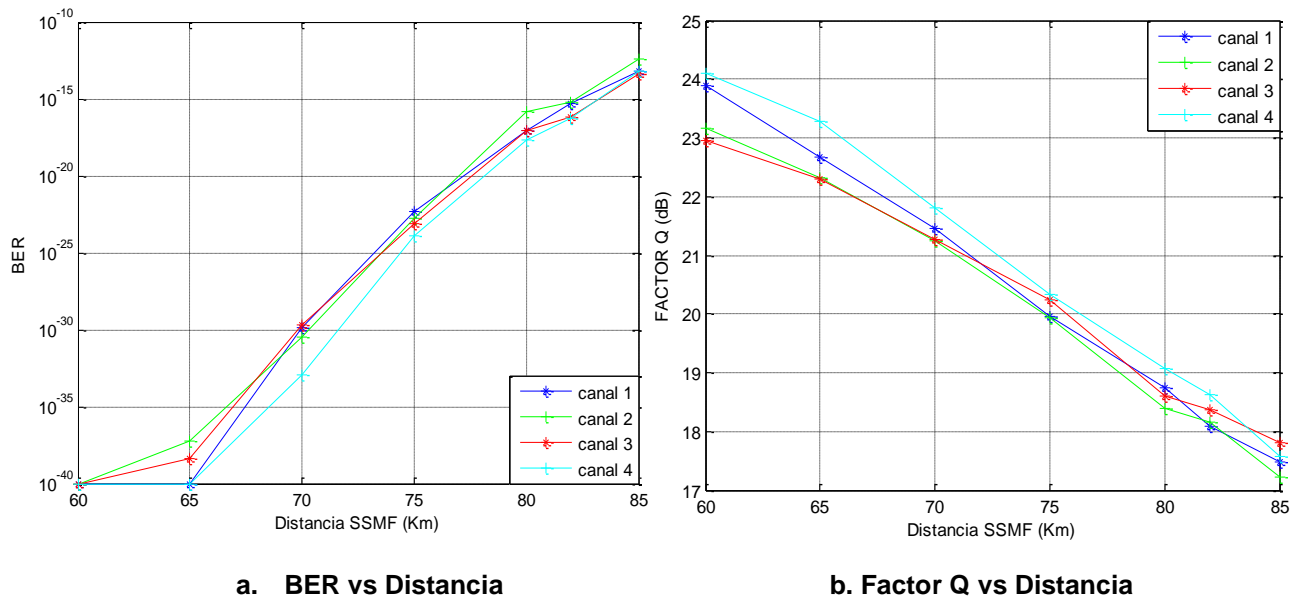


Figura 2.5 Desempeño del enlace frente a variaciones de la longitud de la SSMF-28 de Corning.

La figura 2.5 evidencia que la máxima distancia que el enlace alcanza es 82Km., cumpliendo los requerimientos de BER= 10^{-15} y factor Q=18 dB.

Para finalizar, se adiciona la DCF al escenario de referencia 1, para determinar el impacto de implementarla. Se hace uso de la ecuación 1, tomada de la sección 1.3.1 (capítulo 1), la cual brinda el soporte teórico y matemático de la relación en distancia y dispersión entre la SSMF-28 de Corning y la DCF.

$$\Delta t = L_{TF}D_{TF}(\lambda)\Delta(\lambda) + L_{DCF}D_{DCF}(\lambda)\Delta(\lambda) \quad (1)$$

Conociendo que:

- Máxima dispersión permisible (Δt) = 25ps
- El ancho espectral del pulso ($\Delta(\lambda)$) = 0.01nm
- Coeficiente de dispersión de la SSMF ($D_{TF}(\lambda)$) = 17 ps/nm/Km
- Coeficiente de dispersión de la DCF ($D_{DCF}(\lambda)$) = -100ps/nm/Km
- longitud de la SSMF (L_{TF}) = 82Km

Se obtiene una longitud de la DCF (L_{DCF}) de 11.06Km. La tabla 2.2 muestra el desempeño del sistema la introducir la DCF.



Tabla 2.2 Desempeño del escenario de referencia con DCF.

	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4
Bit Error Rate (BER)	7.3898 e-6	3.2695 e-6	9.16108 e-6	9.06799 e-6
Factor Q	12.833370	13.174770	12.764384	12.718214

Teóricamente se esperaría que los resultados obtenidos indicaran una mejora en el rendimiento del sistema al implementar la DCF, sin embargo como se observa en la tabla 2.2 no se tiene una mejora, razón por la cual se realizan los siguientes análisis.

En primer lugar se observa que la ecuación (1) utilizada para el cálculo de la DCF ha sido definida para alcanzar un BER de 10^{-9} por lo que pretender un valor de BER superior a este, es difícil. Revisando los valores de la tabla 2.2, se evidencia que a pesar de no encontrar una respuesta adecuada del sistema, el rendimiento del mismo no se encuentra muy lejos del valor teórico esperado.

Un segundo análisis indica que la diferencia en los coeficientes de atenuación de las fibras SSMF (0.235 dB/Km) y DCF (0.55 dB/Km) pueden generar un impacto considerable ya que la señal transmitida tendría que presentar un nivel de potencia suficiente para pasar de una fibra de menor atenuación (SSMF) a otra con mayor atenuación (DCF). Esta situación conlleva a rediseñar el enlace ya sea disminuyendo la longitud de una de estas dos fibras, con el fin de disminuir el valor de atenuación por kilómetro que se introduce a la señal o inyectando mayor potencia al enlace para compensar dicha atenuación.

Una vez terminado el escenario de referencia 1, en la configuración 1.1 Atenuación, se realizan pruebas para verificar lo mencionado anteriormente. Por el momento se varia la longitud de la DCF hasta lograr que el sistema cumpla con los valores de BER y Factor Q definidos.

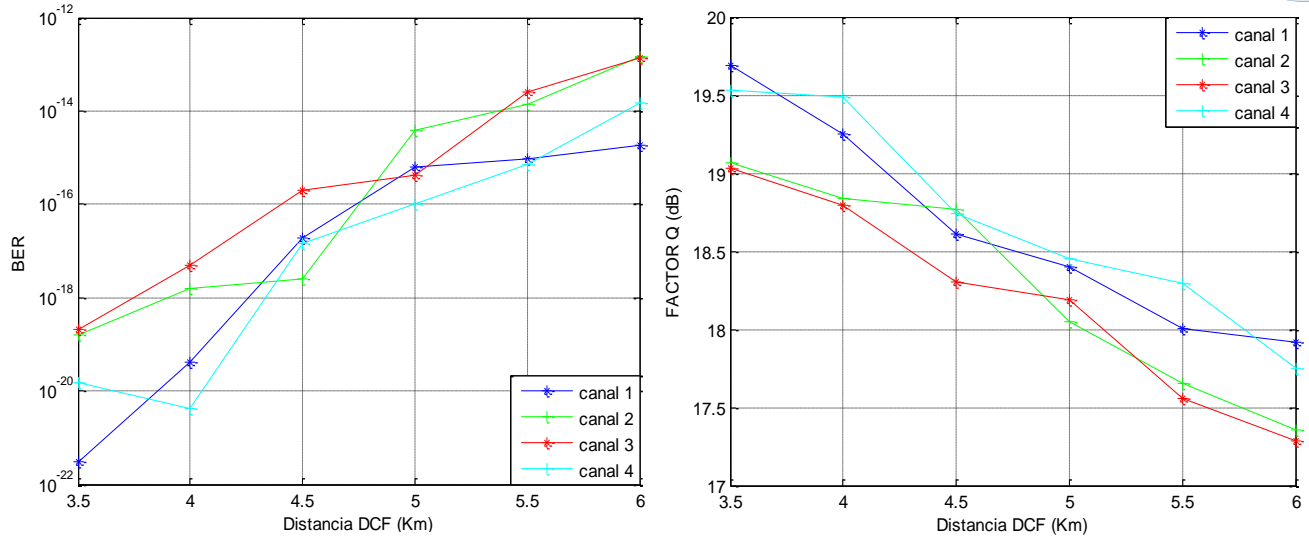


Figura 2.6 Comportamiento del enlace frente a variaciones de la longitud de la DCF.

La figura 2.6 evidencia que bajo las condiciones actuales del escenario de referencia 1, la distancia de la DCF que cumple con un BER= 10^{-15} y un factor Q=18, debe ser 5Km, 6 menos de la distancia teórica encontrada.

Apoyado en los análisis presentados en esta sección y en los resultados obtenidos tras cada prueba es posible observar que, el comportamiento en recepción de los cuatro canales implementados es muy parecido, como se esperaba teóricamente, debido a que las cuatro longitudes de onda son transmitidas por el mismo medio (fibra SSFM-28) y alteradas en similar proporción por el mismo. Por lo tanto, en las posteriores configuraciones se evalúa un solo canal.

La figura 2.7, muestra el escenario de referencia 1 sobre el cual se hacen las diferentes configuraciones mencionadas en el ítem 2.2.2 para observar el impacto de las propiedades de la DCF.

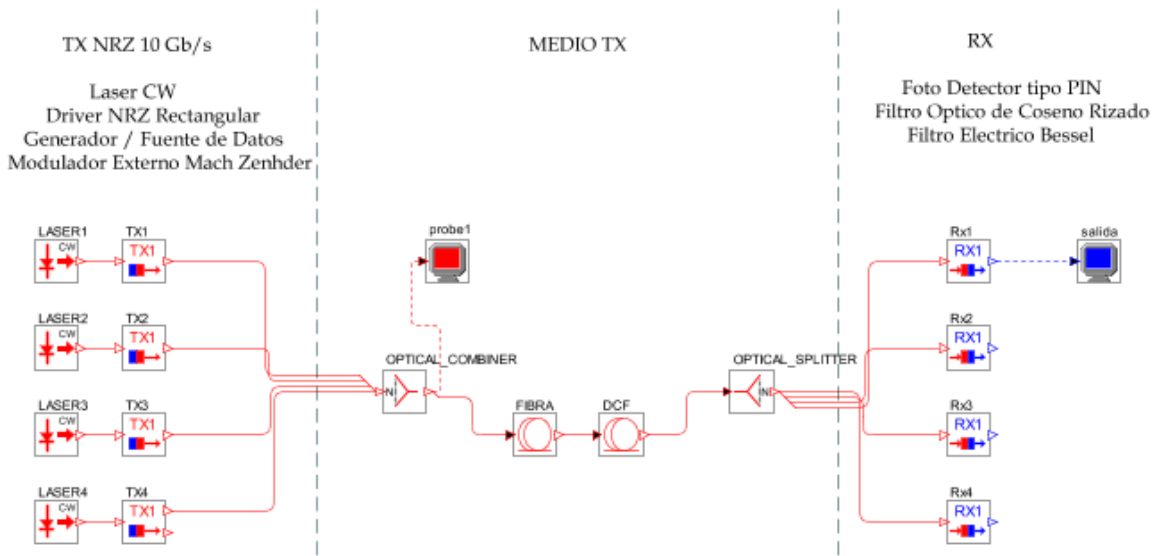


Figura 2.7 Escenario de referencia 1.

Configuración 1.1 Atenuación: Esta configuración se hace con el fin de analizar cómo diferentes valores de atenuación de la DCF, impactan los parámetros de diseño del sistema, particularmente la potencia y la distancia. A partir de estos resultados se da respuesta a la hipótesis planteada en el escenario de referencia 1, acerca del cambio en potencia o distancia para contrarrestar el efecto de la atenuación.

La tabla 2.3, muestra los nueve valores de atenuación de la DCF definidos para el análisis, los cuales oscilan entre valores comerciales y no comerciales alrededor del valor de referencia (0.55 dB/Km).

Tabla 2.3 Valores de atenuación de la DCF.

Atenuación (dB/Km)	3.5	2.7	1.8	1	0.55	0.4	0.3	0.235	0.1
--------------------	-----	-----	-----	---	------	-----	-----	-------	-----

A. Potencia: Se definen dos pruebas para analizar cómo el aumento de potencia impacta en el diseño del sistema. Las pruebas que se realizan son: primero, el aumento del nivel de potencia desde la fuente óptica; y dos, aumento de potencia a través del uso de amplificadores.

- Prueba 1: se aumenta el nivel de potencia del canal desde la fuente óptica.

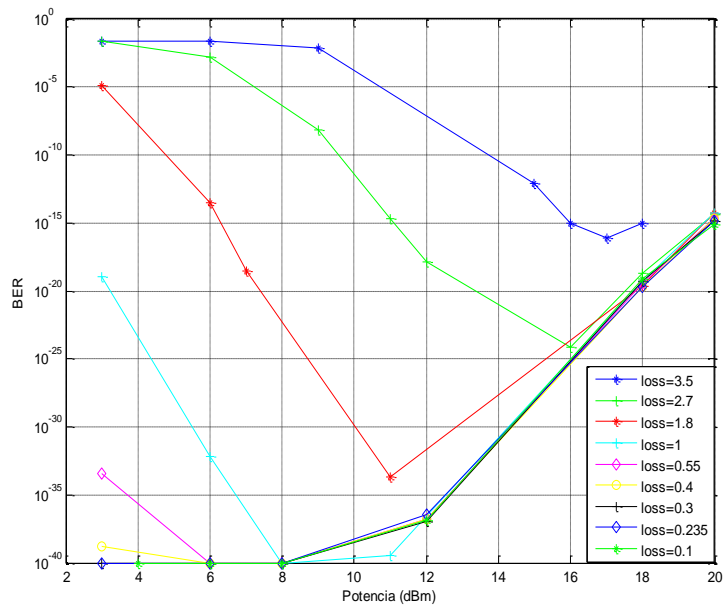


Figura 2.8 BER vs Potencia para diferentes valores de atenuación de la DCF.

La figura 2.8, muestra que para cada valor de atenuación existen diferentes valores de potencia dentro de los cuales se destacan:

- Potencia mínima: Hace referencia al valor mínimo de potencia que el sistema necesita para cumplir con el BER y factor Q definido.
- Potencia de trabajo: Es el valor de potencia al cual el sistema responde de mejor forma.
- Potencia máxima: Es el valor hasta el cual es recomendable aumentar la potencia para que el sistema siga cumpliendo los parámetros de desempeño definidos.

Estos valores de potencia conforman el rango de potencia para cada valor de atenuación.

- Prueba 2: se aumenta el nivel de potencia con el uso de amplificadores (equipo adicional) EDFA, en configuración Inline y Pre-amplificación, y amplificadores Raman.

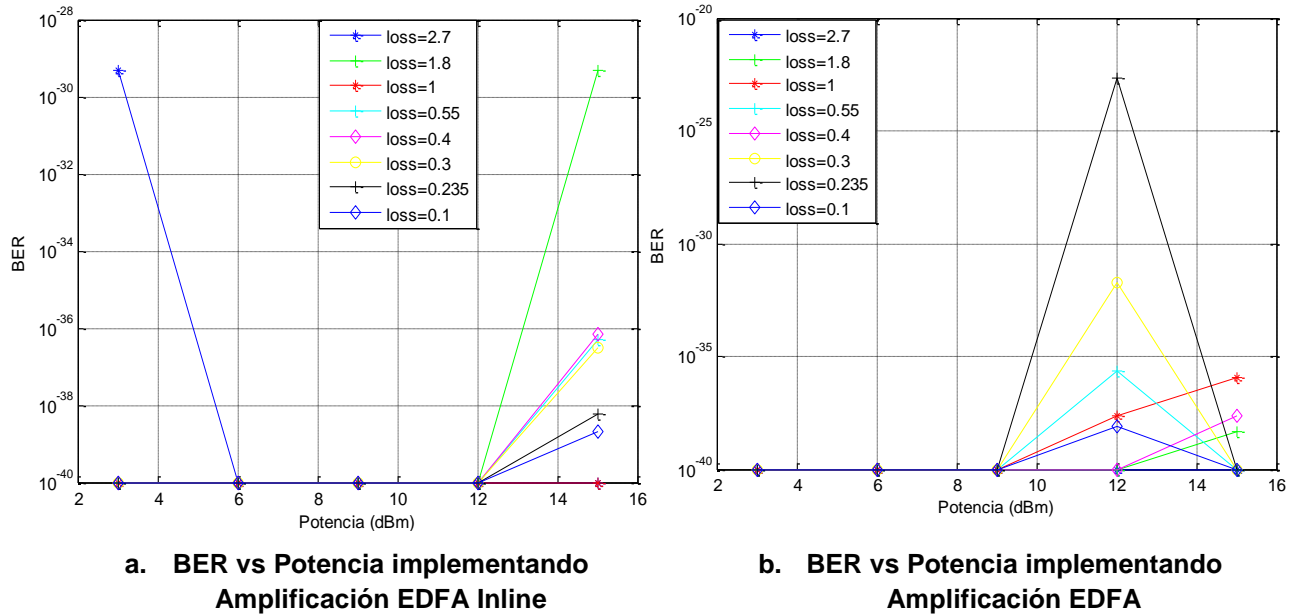


Figura 2.9 Amplificación EDFA.

La figura 2.9, muestra el comportamiento del sistema al hacer uso de amplificadores EDFA en las configuraciones mencionadas. Aunque las configuraciones Inline y Pre-amplificación tienen rangos de potencia de 6-12dBm y 3 - 6dBm respectivamente, en los cuales el sistema presenta un buen desempeño y es estable independiente del valor de atenuación, la configuración en pre-amplificación requiere menos potencia para alcanzar ese desempeño.

La figura 2.10, muestra el comportamiento del sistema ante la amplificación Raman la cual se implementa al inicio de la fibra de transmisión.

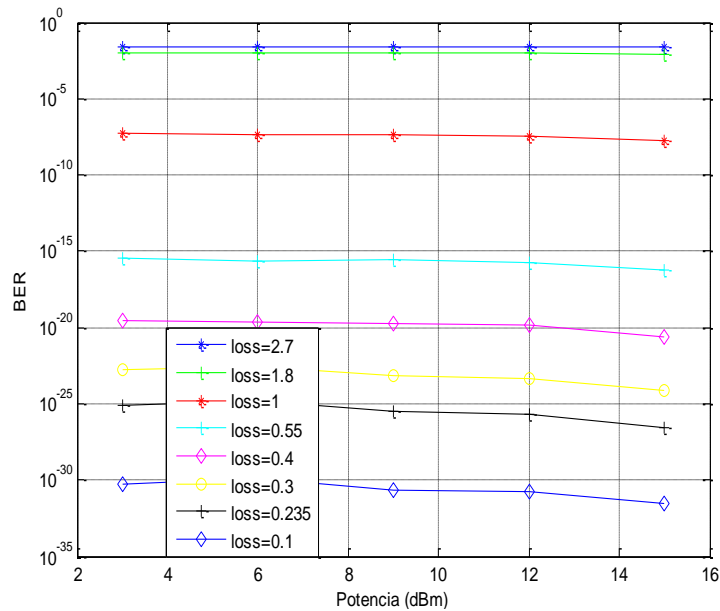


Figura 2.10 Comportamiento del enlace implementando amplificación Raman.

La figura 2.10, muestra un comportamiento independiente del sistema ante los diferentes valores de potencia implementados en la amplificación Raman y presenta niveles constantes de desempeño dependientes de los valores de atenuación de la DCF empleados, de los cuales los definidos en el rango de 0.1 – 0.55 dB/Km cumplen con el BER y factor Q definidos.

B. Distancia: Una vez analizadas las opciones para adicionar mayores niveles de potencia al sistema, se observa como estos últimos impactan el alcance del enlace.

Debido a que el uso de amplificadores aumenta el costo del sistema y en las condiciones actuales no es estrictamente necesario, para esta prueba se consideran solo los valores de potencia entregados por la fuente óptica, dentro de los cuales se toman: la potencia de trabajo, la potencia máxima y la potencia promedio de trabajo. Esta última se obtuvo al promediar las diferentes potencias de trabajo.

La tabla 2.4, muestra los valores de las potencia mencionados para la prueba.

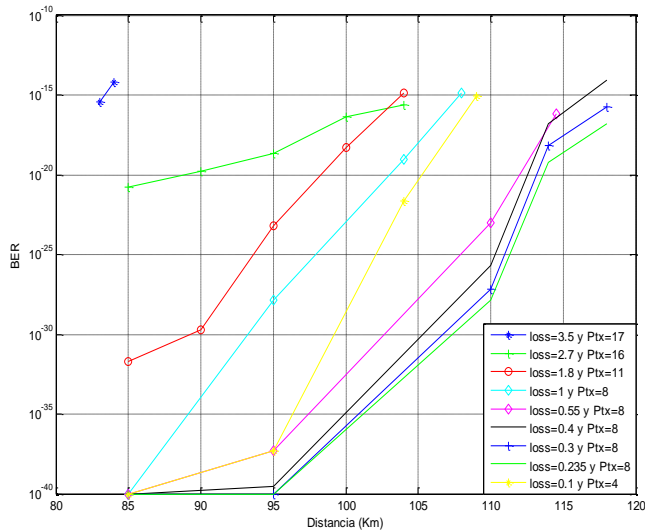
Tabla 2.4 Valores de potencia de transmisión.

Potencias (dBm)	Valores de Atenuación (dB/Km)								
	3.5	2.7	1.8	1	0.55	0.4	0.3	0.235	0.1
Trabajo	17	16	11	8	8	8	8	8	4
Promedio	10	10	10	10	10	10	10	10	10

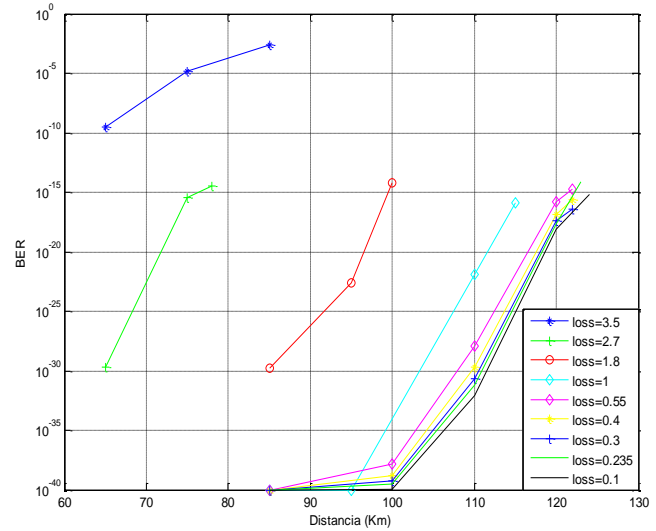


Máxima	20	20	20	20	20	20	20	20	20
--------	----	----	----	----	----	----	----	----	----

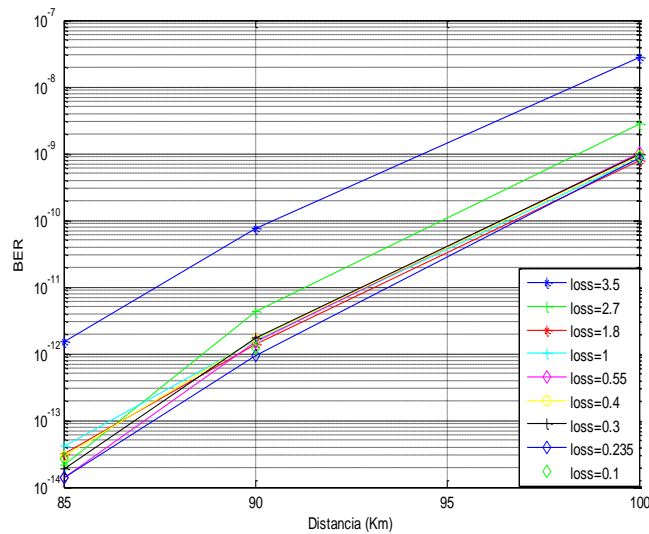
La figura 2.11, muestra las distancias máximas del enlace ante los diferentes valores de potencia mencionados en la tabla 2.4.



a. Distancia Máxima con Potencia de Trabajo.



b. Distancia máxima con Potencia Promedio de Trabajo.



c. Distancia máxima con potencia máxima.

Figura 2.11 Máximas distancias alcanzadas en el enlace ante las potencias (a) de trabajo, (b) promedio de trabajo y (c) máxima.



En la figura 2.11, se observa que los tres valores de potencia escogidos para la prueba permiten superar la distancia inicial; no obstante, solo para los valores de potencia de trabajo y potencia promedio de trabajo las distancia alcanzadas superan los 100Km cumpliendo con los valores de BER y Factor Q definidos. Con este último valor de potencia se logra la máxima distancia del enlace de 12Km.

De la configuración 1.1 se concluye:

- Un valor adecuado de potencia a implementar, para valores de atenuación de la DCF de hasta 2.7 (dB/Km) es de 10 (dBm).
- El aumento de potencia no controlado impacta negativamente el desempeño del sistema, existe siempre un límite, que para este caso de estudio es de 20 (dBm).
- Para tener un máximo alcance del enlace, sin uso de amplificación, la atenuación puede ser escogida dentro del rango 0.235 a 0.55 dB/Km. no obstante, es aconsejable que la atenuación de la DCF sea igual a la de la fibra de transmisión.
- El uso de EDFA en Pre-amplificación en comparación con EDFA Inline y amplificación Raman, presenta mejor desempeño para el formato de modulación NRZ-OOK.

La tabla 2.5, resume los resultados de la configuración 1.1 Atenuación.

Tabla 2.5 Resumen de los resultados de la configuración de atenuación de la DCF.

PARÁMETROS	NRZ-OOK
Rango de potencias (dBm)	0 – 10
Rango de distancias máximas (Km)	82 – 125
Valor de atenuación (dB/Km)	0.235

Configuración 1.2 Dispersión: Se realiza la prueba referente a la dispersión de la DCF. Esta configuración se hace con el fin de analizar cómo diferentes coeficientes de dispersión impactan los parámetros de diseño del sistema particularmente en la potencia, la distancia y el espaciado entre canales.

La tabla 2.6, muestra los nueve coeficientes de dispersión de la DCF definidos para el análisis, algunos comerciales y otros calculados a partir de la ecuación 2.



Los valores de dispersión acumulada se toman de valores definidos por los fabricantes.

Las pruebas realizadas en esta configuración, se hacen sobre el escenario de referencia 1 ajustado a los resultados consignados en la tabla 2.5.

$$dispersión\ acumulada = L_{TF}D_{TF} + L_{DCF}D_{DCF} \quad (2)$$

Tabla 2.6 Coeficientes de dispersión de la DCF.

Dispersión (ps/nm/Km)	-17	-50	-80	-95	-100	-120	-170	-250	-333
-----------------------	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------

Antes de realizar las pruebas correspondientes a distancia y espaciamento entre canales, se varía la potencia de transmisión para cada uno de los valores de la tabla 2.5, con el fin de observar si la disminución del coeficiente de dispersión de la DCF permite reducir este importante parámetro de diseño. La figura 2.12, muestra el comportamiento del sistema ante la disminución de potencia y el aumento del coeficiente de dispersión de la DCF.

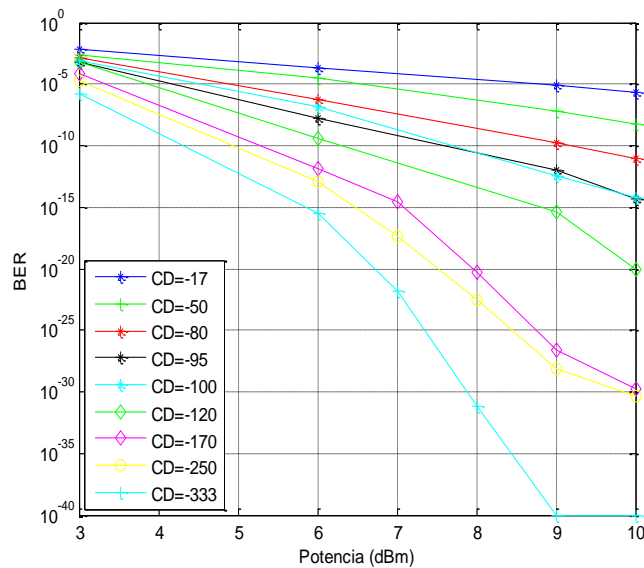


Figura 2.12 Comportamiento del enlace ante la variación de la potencia a diferentes valores del coeficiente de dispersión de la DCF.

Se observa acorde a la figura 2.12, que es posible disminuir la potencia del enlace manteniendo los parámetros de desempeño del sistema, con el aumento del coeficiente de dispersión. Así mismo se observa, que los aumentos del coeficiente



de dispersión deben hacerse, para este formato, a partir de -95ps/nm/Km , ya que para valores menores la compensación de dispersión cromática no es suficiente.

Continuando con las pruebas para analizar el impacto sobre los parámetros de diseño mencionados, se tiene:

A. Distancia

Para este parámetro de diseño se realizaron dos pruebas: La primera, sobre la SSMF-28 de corning, para la cual se encontró la máxima longitud que cumple con los parámetros de desempeño; la segunda, sobre la DCF, para la cual se encontró la máxima longitud que permitiera una mejora en el desempeño del sistema.

- Prueba 1: Para los coeficientes de dispersión de la DCF descritos en la tabla 2.5 a partir de -95ps/nm/Km , se encuentra la máxima longitud de la SSMF-28 de corning tal que cumpla con los parámetros de desempeño definidos.

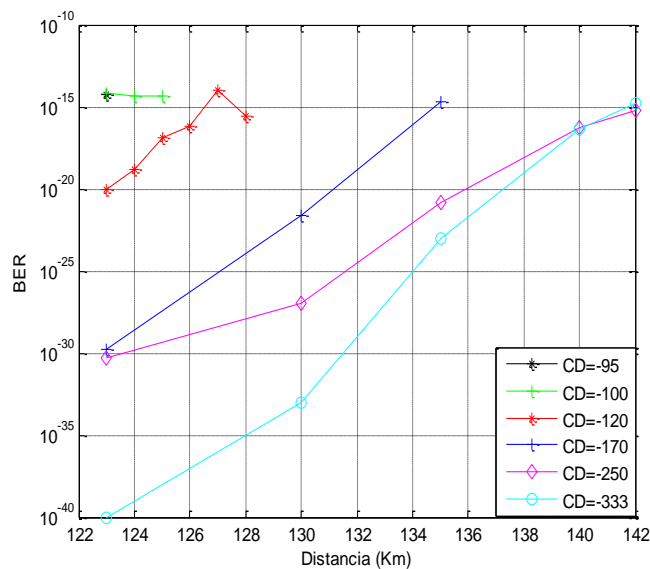


Figura 2.13 Máxima longitud de la SSMF para diferentes coeficientes de dispersión de la DCF.

En la figura 2.13, se evidencia que la disminución del coeficiente de dispersión permite alcanzar mayores distancias de transmisión, logrando una distancia máxima de 142Km. Esta distancia se alcanza con una CD de -250 o -333 ps/nm/Km .



- Prueba 2: Una vez obtenida la máxima longitud de la SSMF-28 de corning, se aumenta la longitud de la DCF con el fin de encontrar el valor máximo que permita mejorar la calidad del enlace.

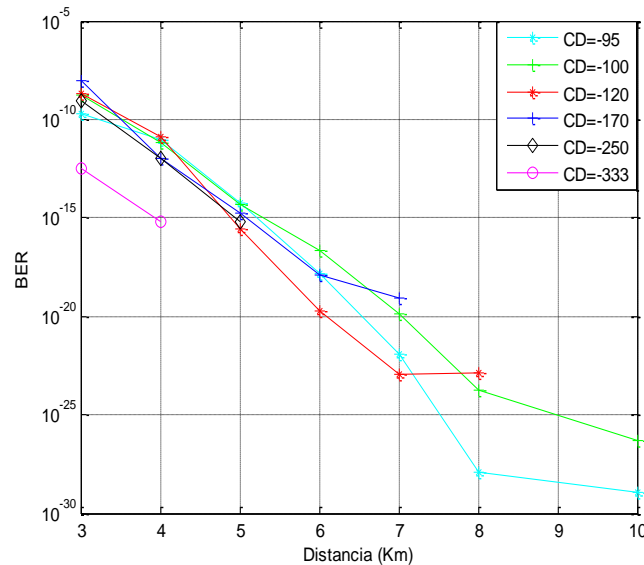


Figura 2.14 Máxima longitud de la DCF para diferentes coeficientes de dispersión de la DCF.

En la figura 2.14, se observa una mejora importante en el desempeño del sistema al aumentar la longitud de la DCF para valores de CD entre -95 y -170, para valores de CD mayores (-250 y -333) la longitud de la DCF debe disminuir para mantener los parámetros de desempeño óptimos. Esto se debe a la relación directa que existe entre la longitud y el coeficiente de dispersión de la DCF (ecuación 2).

B. Espaciamiento entre canales

Disminuir el espaciamiento entre canales permite aumentar la cantidad de canales sobre los cuales se puede enviar información, por lo tanto, se analizará si es posible con la disminución del coeficiente de dispersión de la DCF, reducir el espaciamiento.

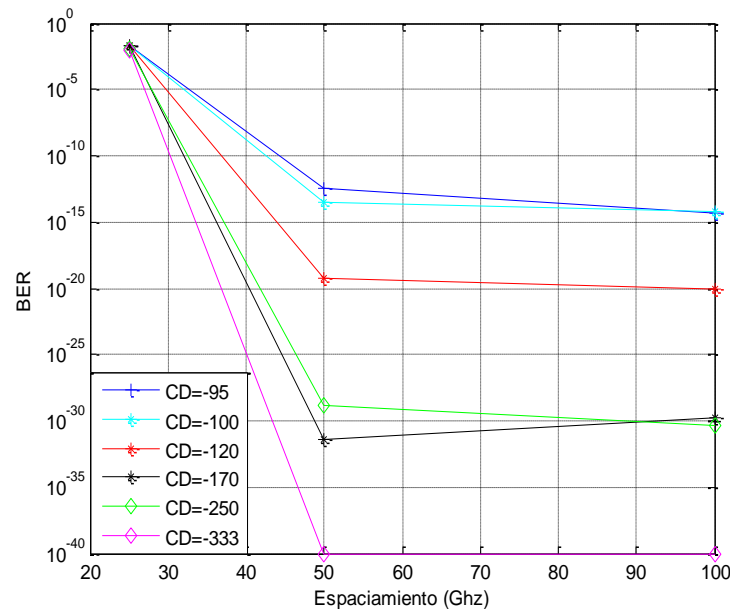


Figura 2.15 Desempeño del enlace ante la disminución del espaciamento entre canales para diferentes coeficientes de dispersión de la DCF.

En la Figura 2.15, se evidencia como el enlace puede duplicar la capacidad de transmisión, manteniendo una BER por encima de la definida (10^{-15}), al ser posible la disminución del espaciamento entre canales de 100Ghz a 50Ghz. Teniendo en cuenta que esta disminución es posible para coeficientes de dispersión en un rango entre -120 y -333 ps/nm/Km.

De la configuración 1.2 se concluye:

- De los coeficientes de dispersión analizados, se selecciona el de -250 ps/nm/Km, ya que permite una máxima distancia del enlace de 142Km y cumple con los valores de BER y factor Q definidos.
- El valor de potencia puede ser reducido con la disminución del coeficiente de dispersión, sin embargo se deja fijo como se definió en la configuración 1.2, para permitir un mayor alcance del enlace.
- El escenario incremental formado hasta el momento, permite disminuir el espaciamento entre canales, logrando así incrementar en el doble la capacidad de transmisión del sistema.

La tabla 2.7, resume los resultados de la configuración 1.2 Dispersión.



Tabla 2.7 Resumen de los resultados de la configuración de dispersión de la DCF.

PARÁMETROS	NRZ-OOK
Rango de potencias (dBm)	0 - 10
Rango de distancias máximas (Km)	125 - 142
Rango de distancias de la DCF (Km)	5 - 10
Espaciamiento entre canales (GHz)	50 - 100
Valor del coeficiente de dispersión adecuado (ps/nm/Km)	-250

2.2.4.2 Caso 2. Formato de modulación RZ-DPSK

En este caso, se implementa el escenario de simulación con el formato de modulación RZ-DPSK a fin de establecer el impacto de la atenuación y el coeficiente de dispersión de una DCF en un sistema WDM, para esto se realizan las dos configuraciones descritas en el ítem 2.2.1.

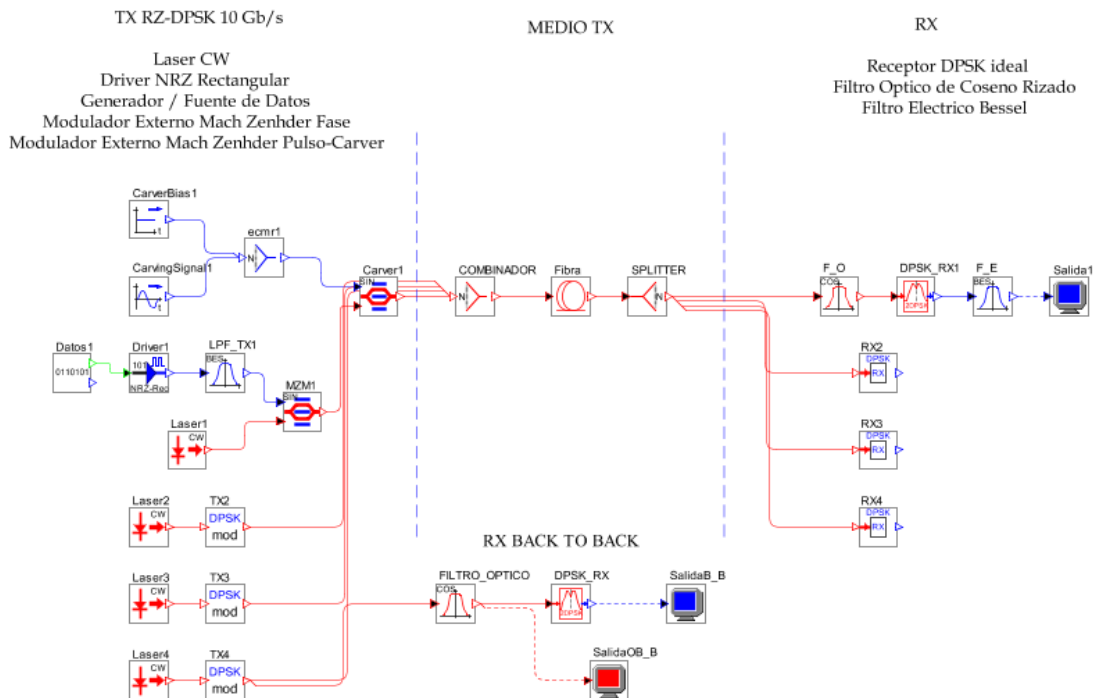


Figura 2.16 Escenario de simulación en OptSim® para el caso 2. Formato de Modulación RZ-DPSK.



En la figura 2.16, se muestra el escenario de simulación para el caso 2 donde el formato de modulación RZ-DPSK es implementado en el transmisor y receptor de la siguiente manera:

- Transmisor: está conformado por un semiconductor láser y adicional al formato NRZ-OOK se utilizan dos Moduladores externos Mach Zehnder (MZM, *Mach-Zehnder Modulator*) para generar las señales moduladas en fase del formato RZ-DPSK.
- En el receptor a diferencia del formato NRZ-OOK se utiliza un Interferómetro Mach-Zehnder (*MZI, Mach-Zehnder Interferometer*) para demodular la señal, ya que en DPSK la información está codificada en la diferencia de fase entre bits consecutivos y no en la fase absoluta de la señal lo cual requiere convertir la diferencia de fase en modulación de intensidad.

Escenario de referencia 2: Se ajustan los parámetros de cada componente del sistema WDM (figura 2.16), de acuerdo a las características del escenario de simulación de la sección 2.2.2 y la tabla 2.1. En primer lugar se realiza una configuración Back to Back para observar el correcto funcionamiento del sistema, posteriormente se analiza el comportamiento del mismo al introducir una fibra SSMF-28 y la DCF. Finalmente se busca la distancia máxima del enlace, para definir así el escenario de referencia 2.

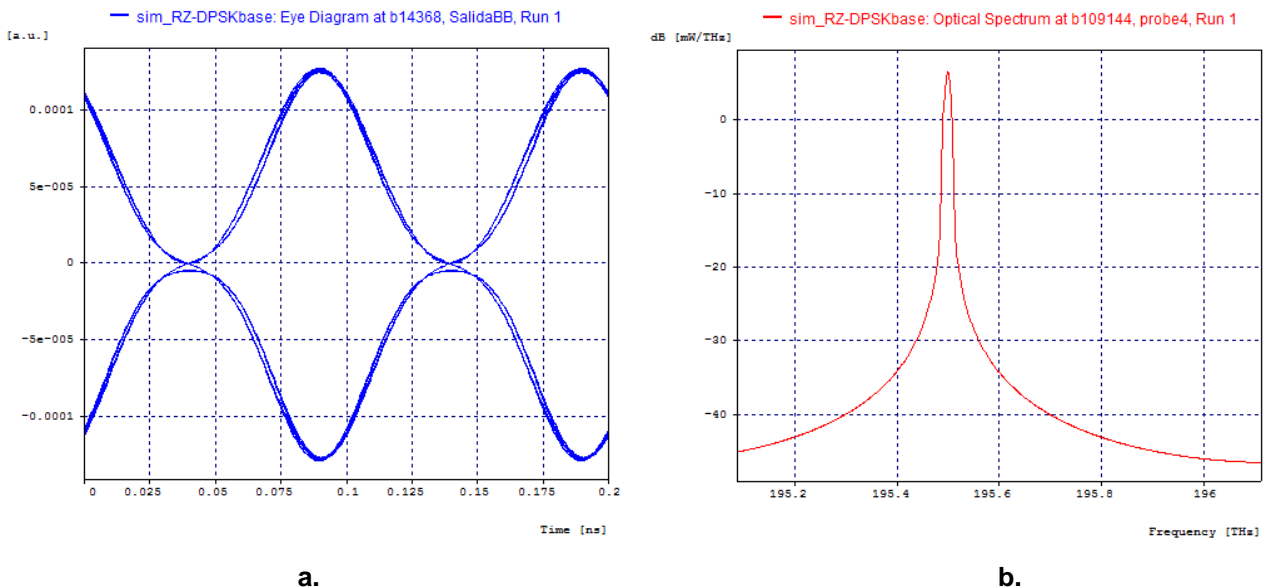


Figura 2.17 Diagrama del ojo (a) y Espectro óptico (b) de la señal RZ-DPSK en el receptor Back-to-Back.



En la figura 2.17, se evidencia el correcto funcionamiento del formato de modulación en la señal obtenida del receptor Back-to-Back. Como se observa tanto el diagrama del ojo, como el espectro óptico de la señal para un solo canal, no presentan degradaciones.

Ahora se procede a encontrar la distancia máxima del enlace con una fibra SSMF-28 que cumpla con el BER definido.

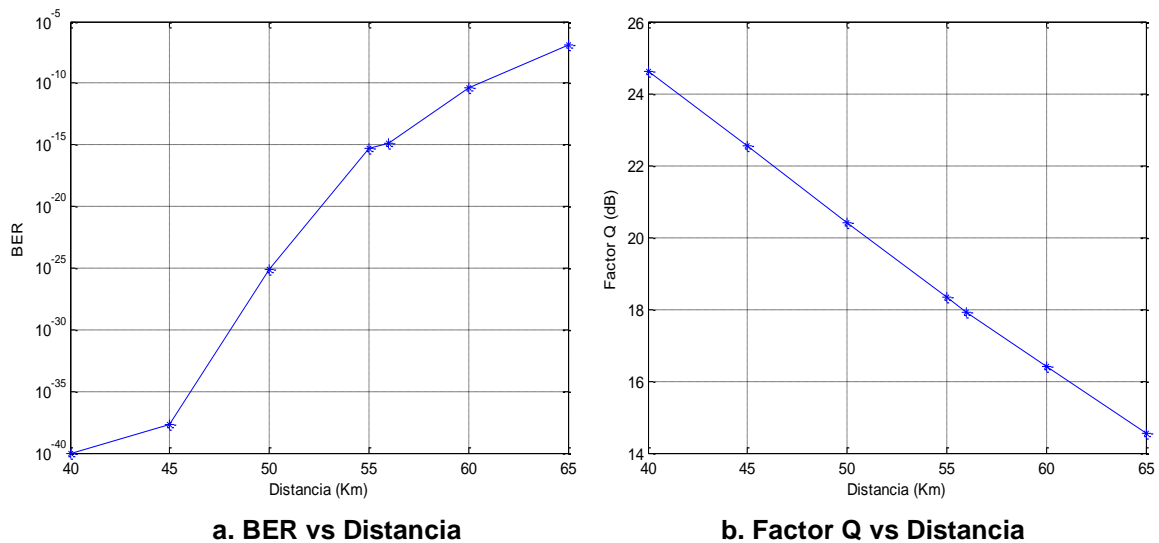


Figura 2.18 Desempeño del enlace frente a variaciones de la longitud de la SSMF-28 de Corning.

Como se observa en la figura 2.18, la máxima distancia alcanzada por el enlace es de 56Km con un BER = 10^{-15} y un factor Q=18 dB, sin compensación de la dispersión; sin embargo, al compararlo con el formato de modulación NRZ-OOK el alcance del presente formato es mucho menor.

A continuación se implementa una DCF en pos-compensación con valores estándar de atenuación y dispersión en un enlace con una fibra de transmisión de 56Km. La distancia de la DCF para compensar al 100% la dispersión cromática, se calcula a partir de la ecuación (1) de máxima dispersión permitida. Conociendo que la máxima dispersión permisible es de 25ps, el ancho espectral del pulso de 0.14nm, los coeficientes de dispersión de la SSMF y la DCF de 17ps/nm/Km y -100ps/nm/Km respectivamente, se obtiene una longitud de la DCF de 7.4Km. La tabla 2.2 muestra el desempeño del sistema al introducir la DCF.

Resultados de simulación con una longitud de la DCF de 7.4Km.

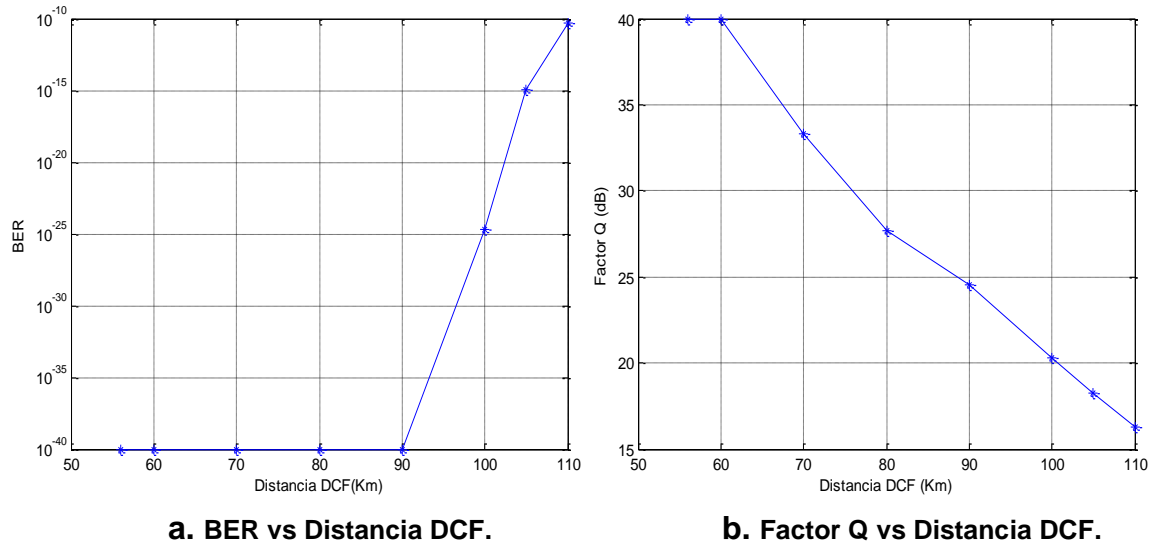


Figura 2.19 Comportamiento del enlace frente a variaciones de la longitud de la DCF.

Como se observa en la figura 2.19, para una distancia de 56Km, la DCF mejora sustancialmente el desempeño del sistema. De acuerdo a esto se procedió a encontrar la distancia máxima soportada por el sistema con una DCF de 7.4Km, que cumpliera con los parámetros de desempeño óptico mínimos, la cual es de 105Km, de manera que implementando compensación de la dispersión, es posible superar la distancia alcanzada por el formato de modulación NRZ-OOK.

La figura 2.20, muestra el escenario de referencia 2 sobre el cual se realizan las diferentes configuraciones mencionadas en el ítem 2.2.2 para observar el impacto de las propiedades de la DCF.

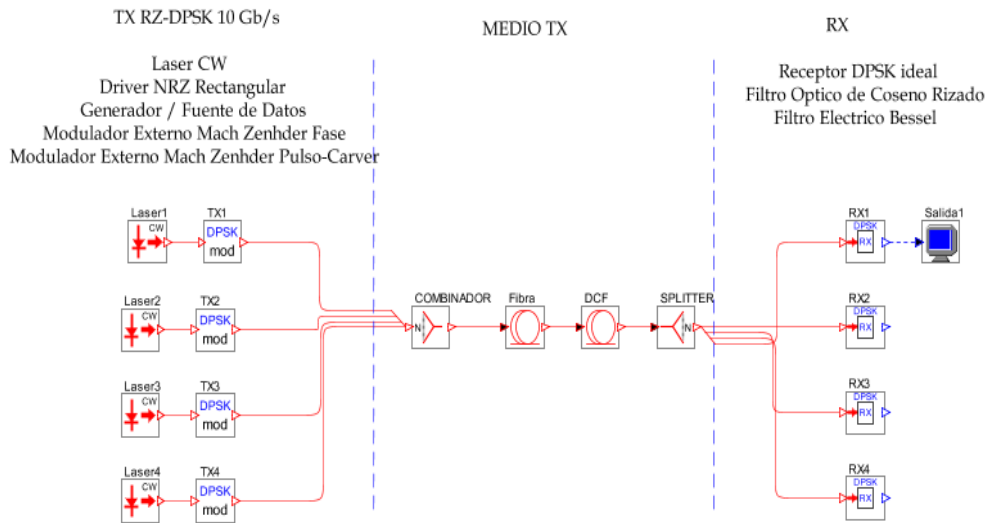


Figura 2.20 Escenario de referencia 2.

Configuración 2.1 Atenuación: Se analiza el comportamiento del sistema ante la variación de la atenuación de la DCF y su impacto sobre el diseño del mismo, principalmente en los parámetros de potencia y distancia; para ello se parte del escenario de referencia 2, se toman los valores de atenuación de la tabla 2.3 y se realizan pruebas con potencia y amplificación, finalmente se hallan las máximas distancias del enlace.

A. Potencia: Sobre el escenario de referencia 2, se realiza la variación de la atenuación de la DCF, para diferentes valores de potencia (prueba 1), además se implementa amplificación (prueba 2) con EDFA, en configuración Inline y Pre-amplificación, y amplificación RAMAN.

- Prueba 1: Se define un rango de potencias como se observa en la tabla 2.8, se aumenta el nivel de potencia del canal desde la fuente óptica.

Tabla 2.8 Rango de potencias de transmisión.

Potencia de transmisión (dBm)	3	6	9	18	23	24	30	31
-------------------------------	---	---	---	----	----	----	----	----

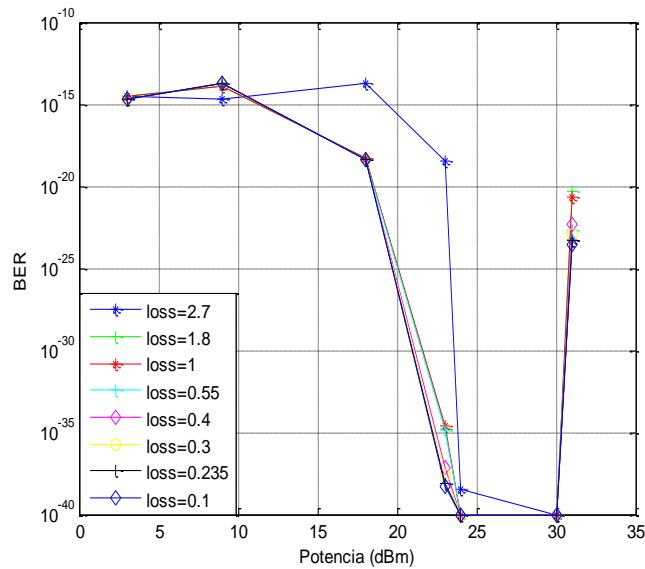
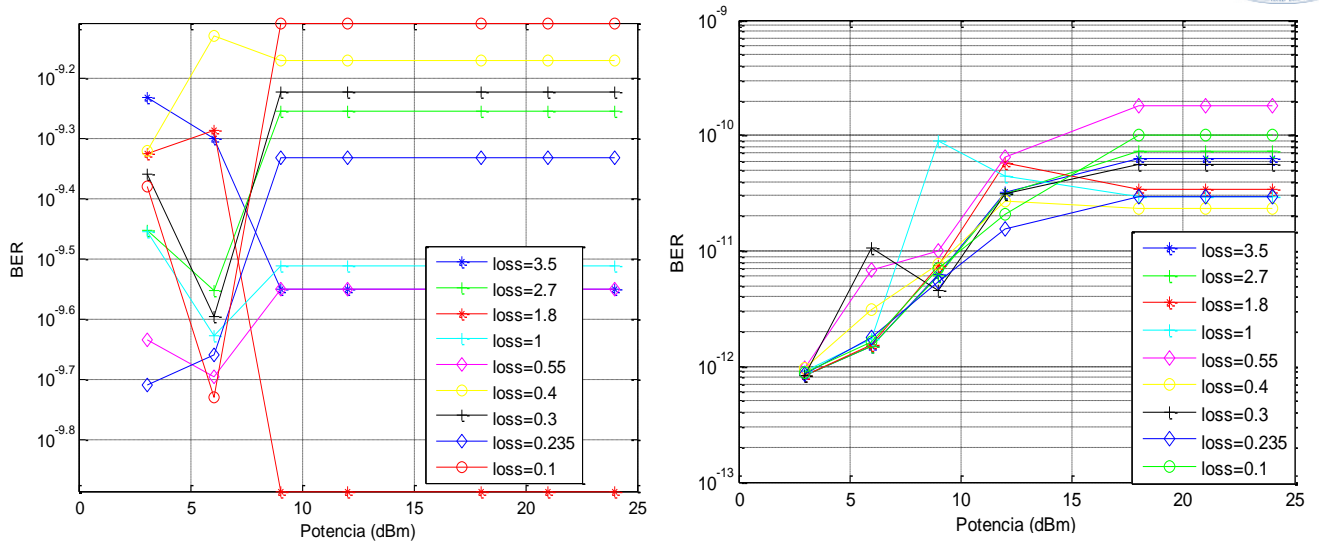


Figura 2.21 BER vs Potencia para diferentes valores de atenuación de la DCF.

En la figura 2.21 se observa el comportamiento del sistema tomando como referencia los valores de BER frente a la variación de la potencia para diferentes valores de atenuación de la DCF. A diferencia del formato NRZ-OOK, este requiere un rango de potencias más elevado para lograr una mejora en el desempeño del sistema, las cuales son: Potencia mínima 0dBm, potencias de trabajo 28 y 29dBm y una potencia máxima de 30dBm. Además se evidencia que a medida que aumenta la potencia, las señales siguen un patrón de comportamiento muy similar independiente del valor de atenuación de la DCF.

- Prueba 2: En las siguientes pruebas se implementa un amplificador EDFA en configuración Inline y Pre-amplificación y por último se implementa amplificación RAMAN, con el fin de observar si existe una mejora importante en el desempeño del sistema.



a. BER vs Potencia implementando Pre-amplificación EDFA.

b. BER vs Potencia implementando EDFA Inline.

Figura 2.22 Amplificación EDFA.

En la figura 2.22, se muestra el comportamiento del sistema al implementar un amplificador EDFA en las configuraciones Inline y Pre-amplificación. Se evidencia que el valor de BER está alrededor de 10^{-10} para ambos casos, lo cual implica que en esta situación cualquiera de las opciones es adecuada.

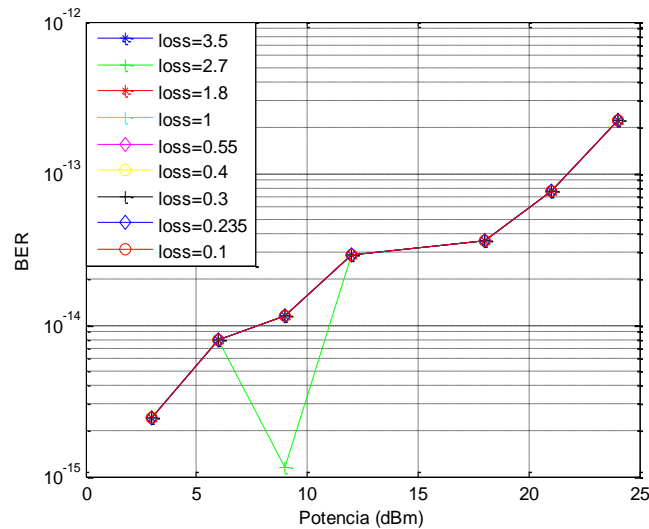


Figura 2.23 Comportamiento del enlace implementando amplificación Raman.

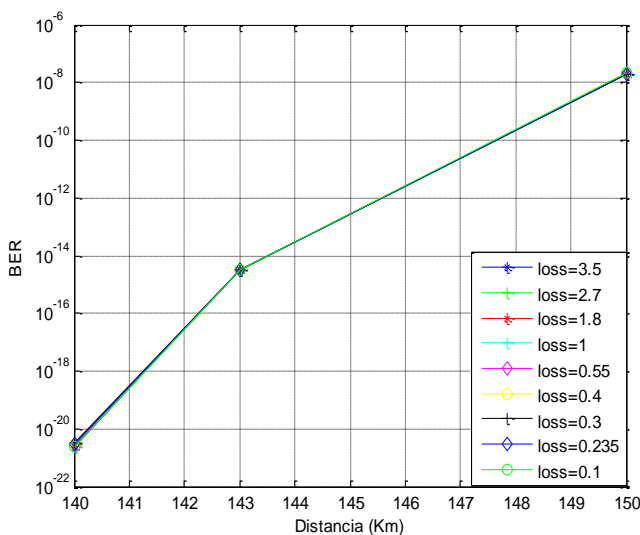
La figura 2.23, muestra una leve mejoría en el valor del BER con respecto a los amplificadores EDFA, sin embargo no es suficiente para lograr el valor



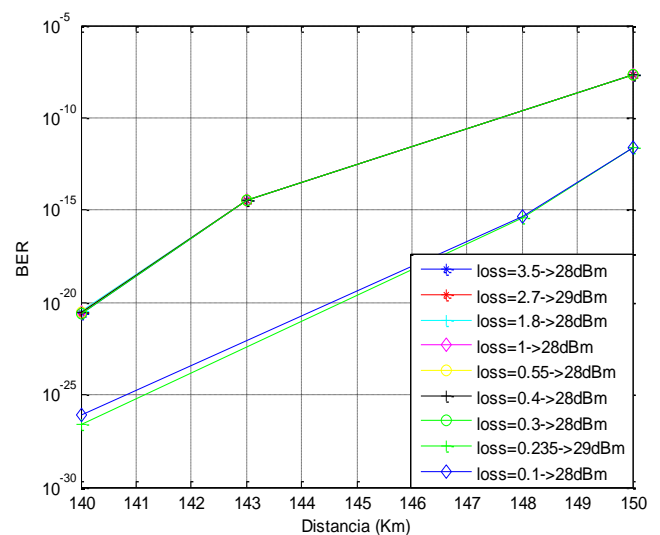
de BER de 10^{-15} requerido, aun con diferentes valores de las potencias; debido a lo anterior los elementos de amplificación se descartan en la realización de las pruebas de distancia.

B. Distancia: en esta prueba se buscan las distancias máximas del enlace para los diferentes valores de potencia. Potencia máxima de 30dBm, potencia de trabajo 28dBm y 29dBm y potencia promedio de trabajo redondeado a 28dBm.

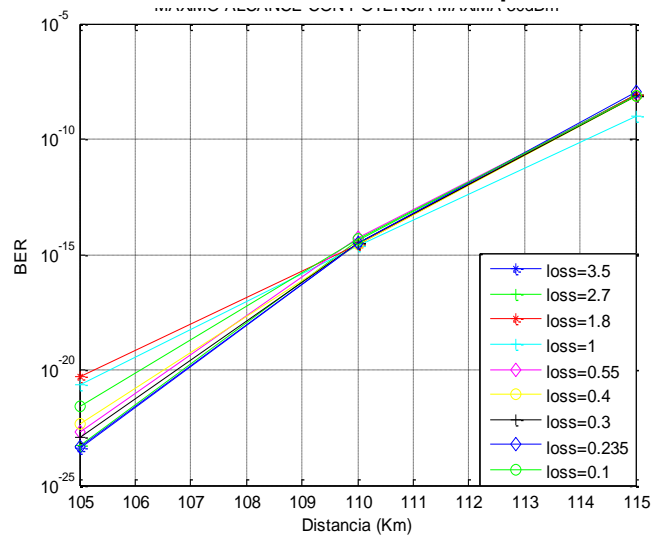
Se procede a encontrar las máximas distancias de la fibra de transmisión para cada uno de los casos.



a. Distancia máxima con potencia de trabajo.



b. Distancia máxima con potencia promedio de trabajo.



c. Distancia máxima con potencia máxima.

Figura 2.24 Máximas distancias alcanzadas en el enlace ante las potencias (a) de trabajo, (b) promedio de trabajo y (c) máxima.



En esta prueba se encuentran las distancias máximas permitidas por el enlace de acuerdo a los parámetros de desempeño definidos, con respecto a la potencia de trabajo obtenida en la tabla 2.8.

Finalmente ya que este formato de modulación es independiente de la atenuación de la DCF, se deja como valor adecuado de atenuación para esta, el valor de 0.55dB/Km.

La tabla 2.9 resume los resultados de la configuración de atenuación de los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-DPSK.

Tabla 2.9 Resultados de la configuración de atenuación de la DCF.

PARÁMETROS	NRZ-OOK	RZ-DPSK
Rango de potencias (dBm)	0 – 10	0 – 28
Rango de distancias máximas (Km)	82 – 125	105 - 143
Valor de atenuación (dB/Km)	0.235	0.55

Configuración 2.2 Dispersión: Esta configuración se hace con el fin de analizar cómo diferentes coeficientes de dispersión impactan los parámetros de diseño del sistema particularmente en la potencia, la distancia y el espaciamiento entre canales, cuando se usa una DCF.

Debido a que el formato RZ-DPSK requiere una elevada potencia para alcanzar una distancia de 143Km, se realiza una prueba a fin de determinar si es posible reducir esta. Para esto se varían los niveles de potencia a diferentes valores del coeficiente de dispersión de la DCF.

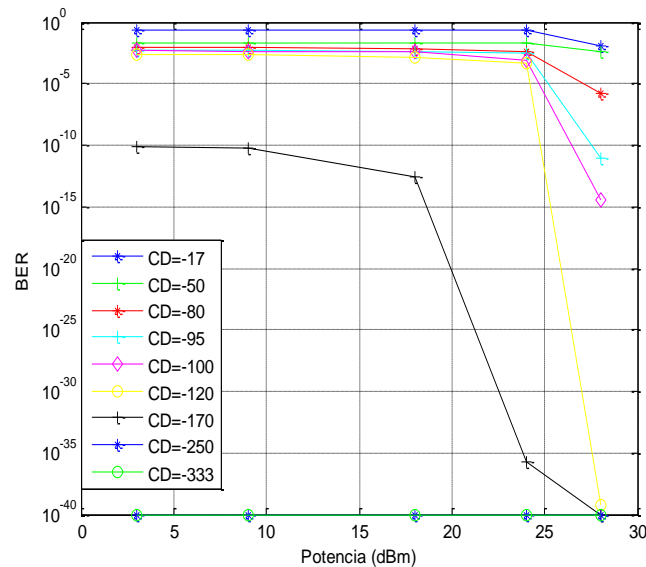


Figura 2.25 Comportamiento del enlace ante la variación de la potencia a diferentes valores del coeficiente de dispersión de la DCF.

La figura 2.25, muestra una disminución del valor del BER a medida que se disminuye el CD. Sin embargo solo para las señales con un CD igual a -250 y -333 ps/nm/Km es posible reducir el valor de la potencia hasta 3dBm, obteniendo un BER de 10^{-40} . Las señales con un CD de -120 y -170 ps/nm/Km alcanzan el valor de BER objetivo con valores de potencia superiores a 24dBm, y solo para -100 ps/nm/Km es posible un BER 10^{-15} con un potencia de 28dBm, lo cual indica que para lograr una disminución de la potencia es necesario un coeficiente de dispersión altamente negativo. De acuerdo a lo anterior se tendrán en cuenta para las posteriores pruebas valores de CD por debajo de -100 ps/nm/Km.

A continuación se realizan pruebas de distancia de la SSMF y la DCF.

A. Distancia: Para este parámetro de diseño se consideran dos pruebas: una sobre la SSMF, encontrando la máxima longitud que cumple con los parámetros de desempeño, y la segunda, sobre la DCF, buscando la máxima longitud que permita una mejora en el desempeño del sistema a partir de las distancias máximas encontradas para la SSMF.

- Prueba 1: Se busca la distancia máxima de la SSMF a diferentes valores del coeficiente de dispersión de la DCF, de manera que cumpla con los parámetros de desempeño definidos.

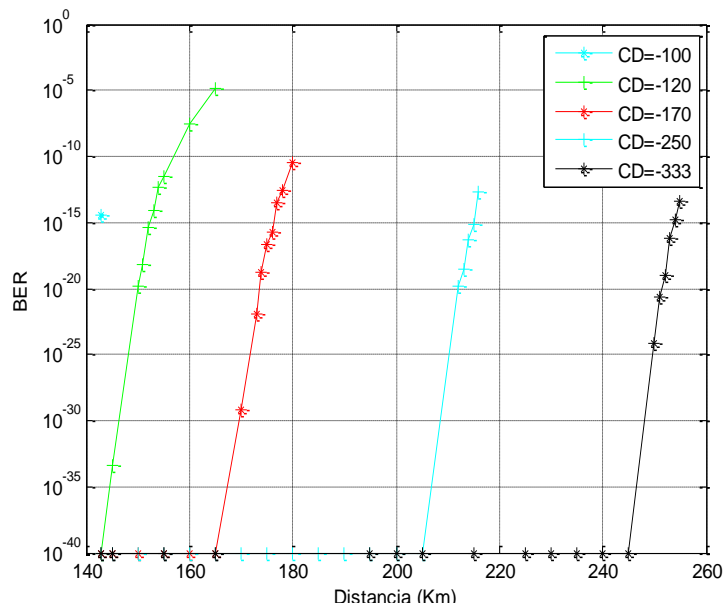


Figura 2.26 Máxima longitud de la SSMF para diferentes coeficientes de dispersión de la DCF.

En la figura 2.26 se evidencia que a medida que se disminuye el valor del coeficiente de dispersión es posible alcanzar mayores distancias de transmisión, obteniendo para un CD de -333 una distancia de 254Km, 112Km por encima del valor logrado en el formato NRZ-OOK con el mismo CD.

- Prueba 2: A partir de las distancias máximas de la fibra de transmisión, obtenidas para cada valor de CD, se incrementa la longitud de la DCF, a fin de encontrar el máximo desempeño del enlace.

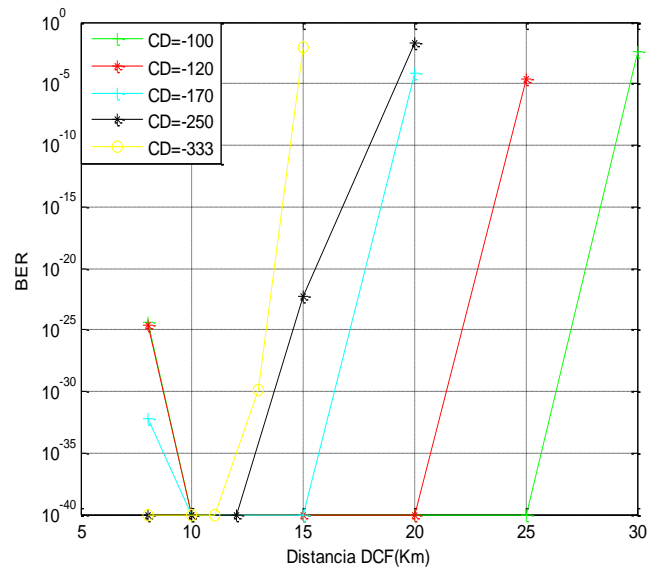


Figura 2.27 Máxima longitud de la DCF para diferentes coeficientes de dispersión de la DCF.

En la figura 2.27, se evidencia una mejora importante en el desempeño del sistema al aumentar la longitud de la DCF en todos los valores de CD simulados. Debido a la relación que existe entre la longitud y el coeficiente de dispersión de la DCF (ecuación 2), cuando el valor del CD disminuye, la longitud máxima también lo hace. A diferencia de este, el formato de modulación NRZ-OOK no logra llegar a una BER de 10^{-40} antes de que el sistema se empiece a degradar de nuevo.

B. Espaciamiento entre canales: a continuación se analiza el espaciamiento entre canales puesto que este factor permite aumentar la cantidad de información que puede ser enviada sobre el enlace.

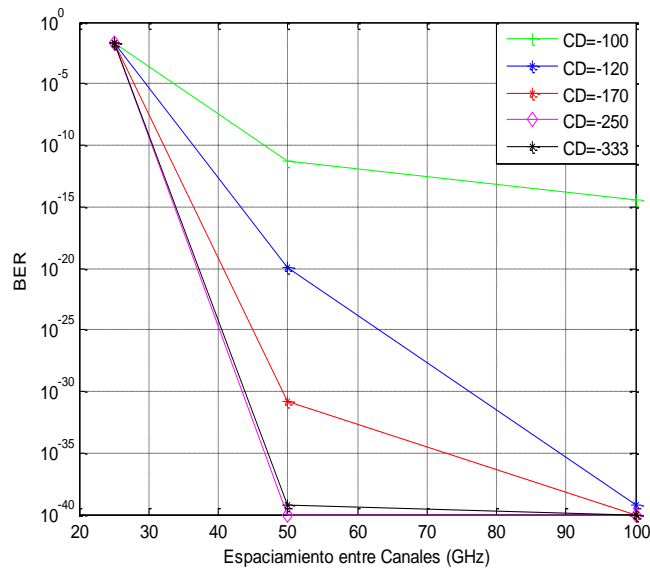


Figura 2.28 Desempeño del sistema ante la disminución del espaciamento entre canales para cada coeficiente de dispersión de la DCF.

La figura 2.28, muestra que es posible disminuir el espaciamento entre canales hasta 50 GHz, para valores de CD inferiores a -120 ps/nm/Km, lo cual permite aumentar la capacidad del sistema; sin embargo la dispersión afecta de manera considerable el desempeño cuando se usan espaciamentos de 25 GHz.

Desde el punto de vista de diseño el coeficiente de dispersión de la DCF, permite obtener mayores distancias del enlace, la posibilidad de disminuir la potencia de la señal y aumentar la capacidad del sistema con un espaciamento entre canales de 50 GHz.

La tabla 2.10 resume los resultados de las pruebas de dispersión de los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-DPSK.

Tabla 2.10 Resultados de la configuración de dispersión de la DCF.

PARÁMETROS	NRZ-OOK	RZ-DPSK
Rango de potencias (dBm)	0 – 10	0 - 28
Rango de distancias máximas (Km)	125 – 142	143 - 250
Rango de distancias de la DCF (Km)	5 – 10	8 - 30
Espaciamento entre canales (GHz)	50 – 100	50 - 100
Valor del coeficiente de dispersión	-250	-333



adecuado (ps/nm/Km)		
---------------------	--	--

Los resultados de las anteriores pruebas evidencian que el formato de modulación RZ-DPSK requiere una elevada potencia para mejorar el BER y alcanzar grandes distancias de transmisión. Por otro lado, aunque el formato de modulación NRZ-OOK no necesita tan altas potencias para mejorar el valor del BER no logra distancias superiores a los 123Km. RZ-DPSK a diferencia del formato NRZ-OOK, no se ve afectado por la atenuación como se evidenció a lo largo de las pruebas.

Desde el punto de vista del impacto del diseño del sistema la atenuación es importante a la hora de escoger un formato de modulación, si se desea un enlace con distancias alrededor de 120Km y bajas potencias es adecuado el formato NRZ-OOK, pero si por el contrario se necesita logran mayores distancias sin que la implementación de altas potencias sea una limitante es adecuado el formato RZ-DPSK ya que tiene además, la posibilidad de migrar a velocidades de 40 Gbps.

De acuerdo a los resultados de la configuración de dispersión, se evidencia que al disminuir el coeficiente de dispersión de la DCF, se alcanza con el formato NR-DPSK alrededor de 100Km por encima del formato NRZ-OOK.

A partir de las diferentes compensaciones de atenuación y principalmente de dispersión, los escenarios de cada caso de simulación soportan un espaciado de 50Ghz, con lo cual se dobla la capacidad de transmisión para cada caso de simulación.

Como se había mencionado, las tres principales propiedades de la DCF a estudiar son: la atenuación, el coeficiente de dispersión y la FOM. Como se observó a lo largo del presente capítulo, se estudiaron las dos primeras. La FOM será tratada en el siguiente capítulo, ya que basados en dicha propiedad se definirán los mejores escenarios.



CAPÍTULO 3. DEFINICIÓN DE CONFIGURACIONES DE DESEMPEÑO DE UN SISTEMA WDM.

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas incrementales realizadas sobre las configuraciones del sistema WDM, presentadas en el capítulo anterior, se hace uso de otra de las propiedades de la DCF, la Figura de Merito (FOM), para encontrar la(s) mejor(es) configuración(es) de desempeño para dicho sistema. Esta propiedad se escoge para este propósito gracias a que establece la relación entre la dispersión y atenuación de la DCF, lo que permite lograr un equilibrio en el sistema a partir de estas propiedades.

Similar a lo descrito en el capítulo anterior, en este capítulo se generan dos escenarios de simulación para los casos de los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ-DPSK. El primero de ellos, se desarrolla considerando un valor alto de FOM denominado escenario FOM-Alto, y que cumple con los valores de los parámetros de desempeño de BER= 10^{-15} y Factor Q= 17 dB; el segundo escenario considera un valor bajo de FOM y se denomina FOM-Bajo, en el cual los parámetros de desempeño se encuentran por encima de los definidos para este trabajo.

La tabla 3.1 indica los parámetros generales a ser utilizados en los dos escenarios/casos de simulación a ser evaluados

Tabla 3.1 Parámetros generales del escenario FOM-Alto y de FOM-Bajo para caso de simulación.

PARÁMETROS	Caso de simulación 1. NRZ-OOK		Caso de simulación 2. RZ-DPSK	
	Escenario FOM-Alto	Escenario FOM-Bajo	Escenario FOM-Alto	Escenario FOM-Bajo
Potencia de Transmisión (dBm)	10	10	28	28
Longitud de la SSMF (Km)	142	100	250	150
Espaciamiento entre Canales (Ghz)	50	50	50	50
Número de canales	4	4	4	4
Atenuación de la DCF (dB/Km)	0.235	0.235	0.55	0.55
Dispersión de la DCF (ps/nm/Km)	-250	-120	-333	-250
FOM de la DCF (ps/nm/dB)	1063.82	510.6	605.454	454.54



Con el fin de evaluar si los escenarios mencionados (FOM-Alto y FOM-Bajo) ajustados a los parámetros consignados en la tabla 3.1 son o no los mejores, se realizan pruebas para evaluar el rendimiento del sistema ante los efectos no lineales: SPM, XPM y FWM y la implementación de amplificadores.

A continuación se describen las pruebas que se llevarán a cabo sobre los escenarios de simulación FOM-Alto y de FOM-Bajo en cada caso de simulación de los formatos de modulación NRZ-OOK y RZ.-DPSK:

En la primera prueba se analiza el impacto de los efectos no lineales, teniendo en cuenta que estos, se presentan principalmente por la variación de la potencia de transmisión (parámetro de diseño). Los efectos lineales se ajustan de la siguiente manera:

- SPM: Se evalúa este efecto en el canal 1, variando la potencia del mismo en un rango de 0 - 30dBm, con separación entre canales de 200 GHz y se fija la potencia de los otros canales en un valor determinado dependiendo del caso de simulación, con el fin de evitar la presencia de los efectos no lineales XPM y FWM sobre el canal evaluado.
- XPM: Se evalúa este efecto sobre el canal 1, fijando la potencia de dicho canal y variando la potencia en el canal 2. El canal 2 actúa como canal de bombeo lo que permite determinar el impacto de XPM sobre el canal 1. La separación entre canales es de 50 GHz.
- FWM: Se varía la potencia de los canales 2, 3, y 4 de forma simultánea dentro del rango de 0 – 30dBm, mientras la potencia del canal 1 permanece fija en 10dBm o 28dBm, según el caso. Se analiza el comportamiento de dicho canal con el fin de observar el nivel de degradación que genera FWM.

En la segunda prueba se busca determinar la distancia máxima del enlace mediante la implementación de varias etapas de amplificación. En el caso de simulación del formato NRZ-OOK se implementa EDFA en Pre-amplificación y para el caso del formato RZ-DPSK, se buscará la opción que presente el mejor desempeño entre EDFA y Raman.



3.1 Caso 1 de simulación. Formato de modulación NRZ-OOK

3.1.1 Escenario FOM-Alto 1.

- Prueba 1: A continuación se muestran los resultados obtenidos de la simulación de los efectos no lineales:

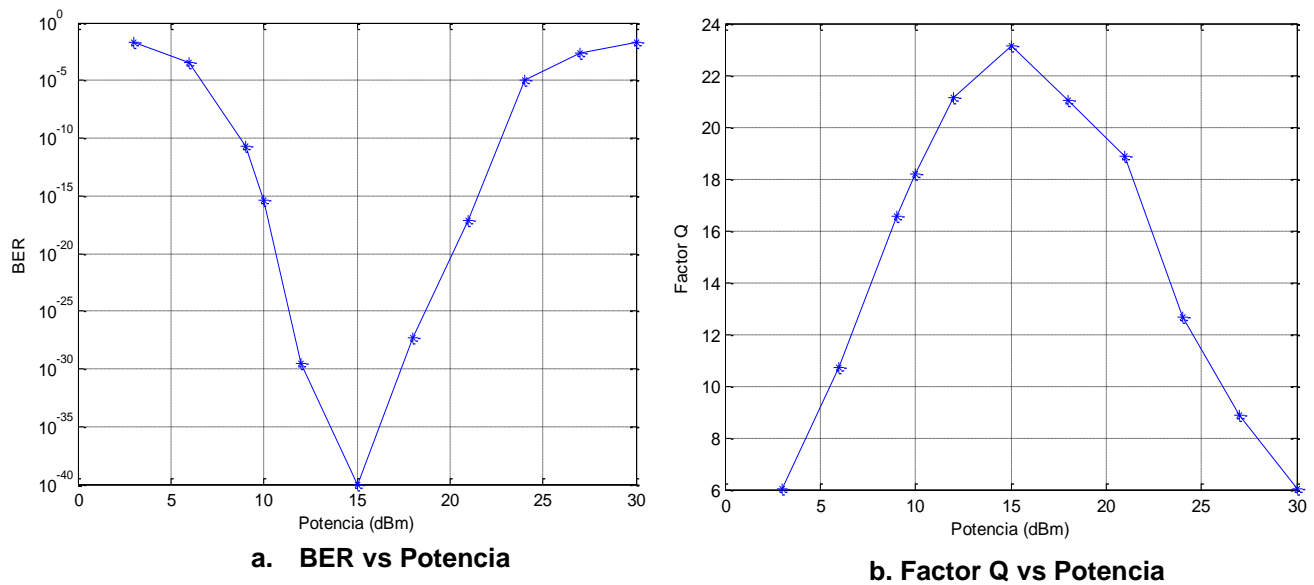


Figura 3.1 Comportamiento del canal 1, ante la variación de la potencia de transmisión.

La figura 3.1, muestra el desempeño del canal 1 ante la variación de la potencia de transmisión. A medida que este parámetro aumenta, el rendimiento del canal empieza a mejorar hasta encontrar su punto máximo para un valor de potencia de 15dBm, luego empieza a descender haciéndose evidente el efecto SPM, volviéndose crítico para valores de potencia mayores a 21dBm. Hasta este valor de potencia el enlace cumple con los valores de BER y Factor Q definidos.

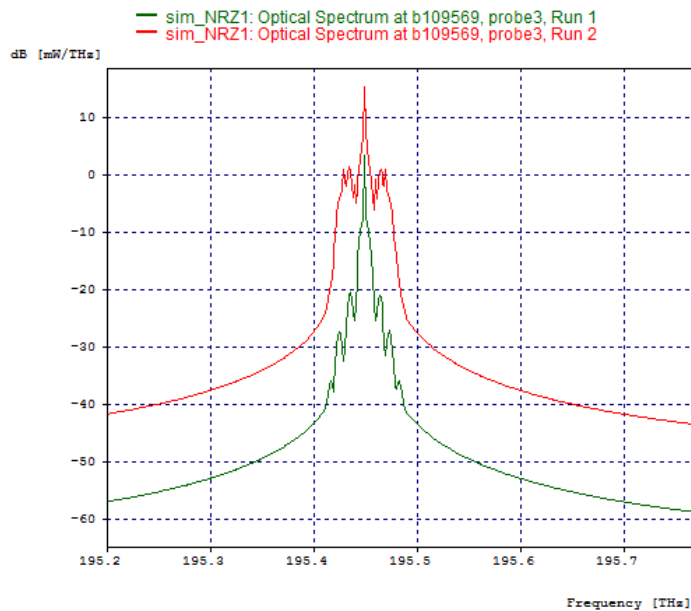
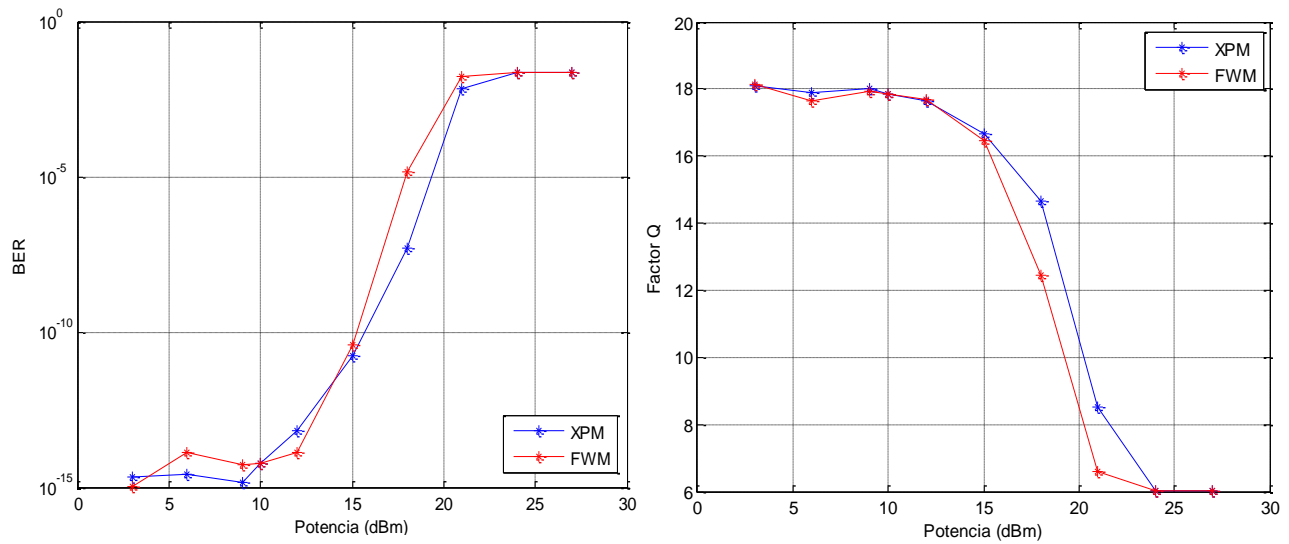


Figura 3.2 Espectro óptico del canal 1, para valores de potencia de 10 y 24dBm.

La figura 3.2 muestra el espectro óptico de la señal en dos niveles de potencia diferentes. El primero de 10dBm (verde), cumple con los parámetros de desempeño definidos y muestra como la forma del pulso no ha sido degradada a diferencia del segundo, de 24dBm (rojo), donde se evidencia el ensanchamiento del pulso ocasionado por el efecto SPM lo que impide al enlace cumplir con los parámetros de desempeño definidos.

En la figura 3.3, se observa la respuesta del canal 1 ante los efectos de XPM y FWM. Debido a que estos efectos se presentan en sistemas de más de un canal (WDM), a diferencia del efecto generado en sistemas de un solo canal, se combinan en una misma gráfica a fin de comparar el nivel de degradación que generan estos dos efectos.



a. BER vs Potencia

b. Factor Q vs Potencia

Figura 3.3 Comportamiento del canal 1, ante los efectos XPM y FWM.

En la figura 3.3, se evidencia que a pesar de la degradación generada por ambos efectos sigue un comportamiento similar, en notable que el efecto FWM impacta más la respuesta del canal 1.

En un rango de potencia entre 3-10dBm, para ambos efectos, el enlace permanece estable cumpliendo con los valores de BER y Factor Q definidos. Valores superiores de potencia afectarán el canal incrementando la degradación generada por XPM y FWM.

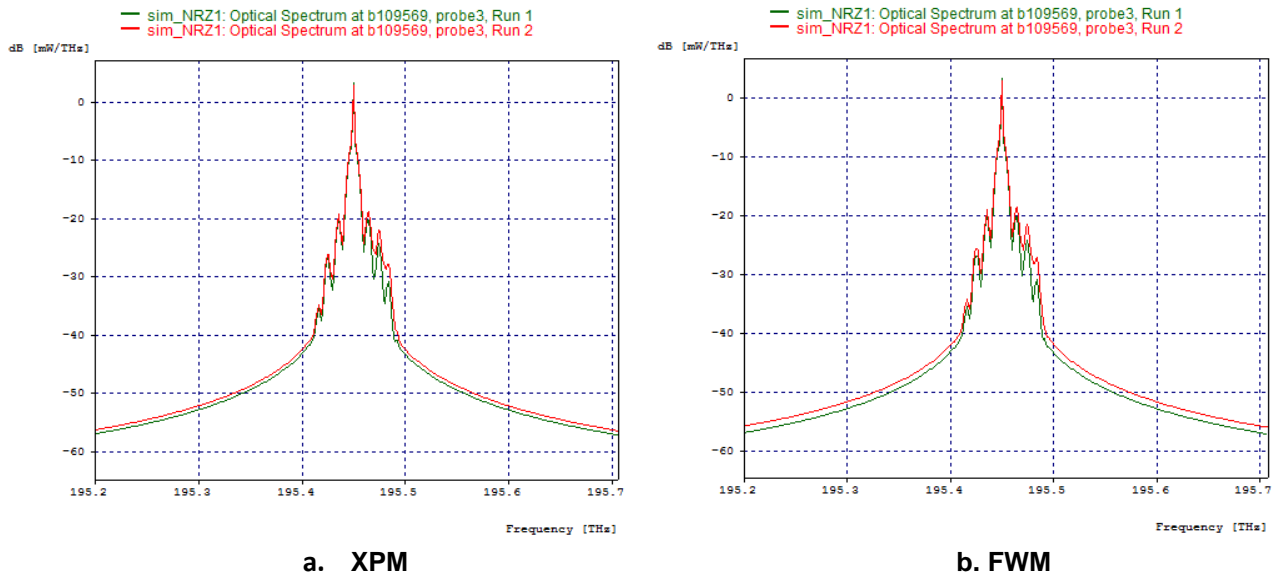


Figura 3.4 Espectro óptico del canal 1 para valores de potencia de 10 y 15dBm, de los efectos (a) XPM y (b) FWM.

La figura 3.4 muestra el espectro óptico de la señal en dos niveles de potencia diferente, 10dBm (verde) y 15dBm (rojo), para los efectos XPM y FWM respectivamente. Como se evidencia en esta figura, el ensanchamiento del pulso ocasionado por los efectos XPM y FWM no es significativo. Sin embargo, solo para el primer nivel de potencia se cumplen los parámetros de desempeño definidos.

- Prueba 2: Basados en la configuración de EDFA en pre-amplificación, se establece un span conformado por una fibra SSMF-28 de Corning, un amplificador EDFA y la DCF.

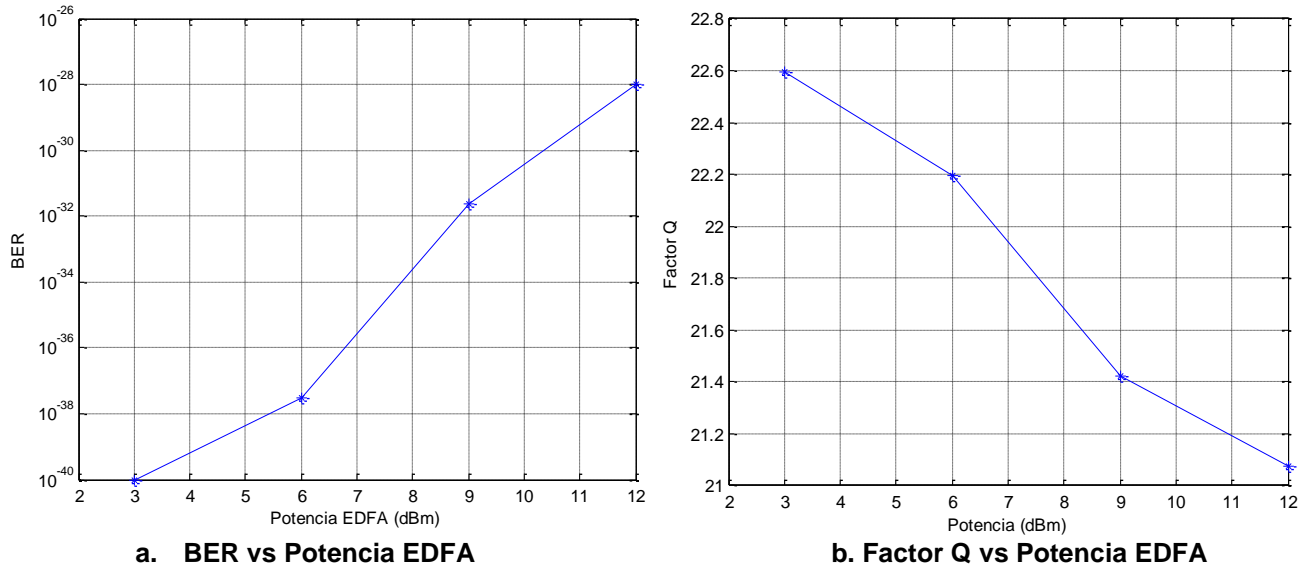


Figura 3.5 Comportamiento del span, ante la variación de potencia del EDFA.

La figura 3.5, muestra que el aumento de la potencia del amplificador EDFA no genera cambios positivos en el desempeño del sistema, razón por la que se fija en 3dBm, al ser el valor más pequeño de los estudiados y para el cual el amplificador mejora la respuesta del span.

La tabla 3.2 indica la máxima distancia del enlace obtenida de la variación del número de span y del número de etapas de amplificación utilizadas en el sistema, de tal forma que los valores de BER y Factor Q estén dentro de los niveles mínimos especificados para un correcto desempeño, esto es: BER= 10^{-15} y Factor Q=17 dB.

Tabla 3.2 Máxima distancia del enlace dependiente del número de span y del número de etapas de amplificación.

Número de Span	Número de EDFA's	Distancia del enlace (Km)	BER	FACTOR Q
1	0	142	5.96e-15	17.862835
	1	142	1e-40	22.594542
2	2	200	2.79e-36	22.048915
3	3	300	9.11e-29	21.114205
4	4	400	5.27e-17	18.573453
5	4	470	2.80e-16	18.343241



Dado que el aumento de potencia del amplificador no genera una mejora en la respuesta del enlace que permita implementar más de un span, se analiza la longitud de la SSMF-28 de Corning. Después de ejecutar varias pruebas de simulación, se encontró que la longitud de la SSMF debe ser de 100Km.

Resultado de las simulaciones se evidencia que existe una relación casi lineal entre el número de span y el número de etapas de amplificación utilizados, excepto en el caso de usar la implementación de spans con o sin amplificación y cuando se implementan 5 span con 4 amplificadores.

En los casos que se utiliza un único span, con o sin amplificación, la máxima distancia alcanzada es de 142Km. Como se puede apreciar en la tabla 3.2, el hecho de utilizar el amplificador mejora el desempeño del enlace.

En el caso de utilizar 5 span, el número de etapas de amplificación es el mismo que en el caso de 4 span, debido a que la implementación de un quinto EDFA no permite que el sistema cumpla con los parámetros de desempeño definidos.

3.1.2 Escenario de FOM-Bajo 1.

- Prueba 1: A continuación se muestran los resultados obtenidos del análisis de los efectos no lineales.

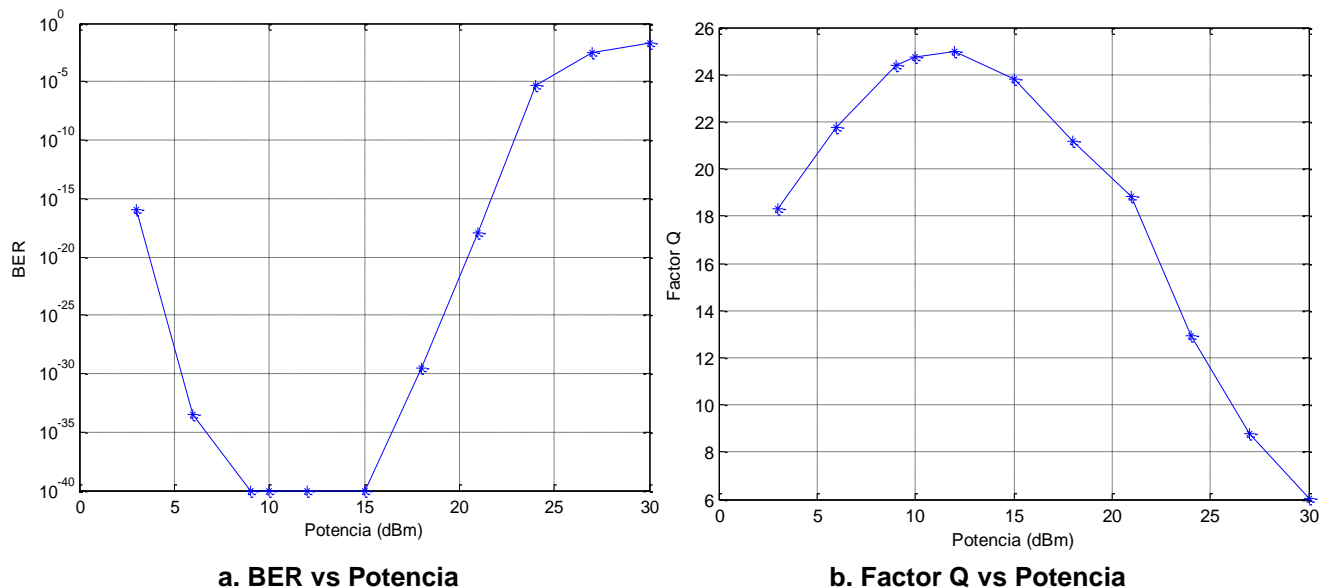


Figura 3.6 Comportamiento del canal 1, ante la variación de potencia de transmisión.



La figura 3.6, muestra el desempeño del canal 1 ante la variación de la potencia de transmisión. A medida que la potencia aumenta, el canal empieza a mejorar hasta que encuentra un rango estable de buen rendimiento (9 – 15dBm). En valores superiores de potencia empieza a hacerse evidente el efecto SPM, volviéndose crítico para valores de potencia mayores a 21dBm. Hasta este valor de potencia el enlace cumple con los valores de BER y Factor Q definidos.

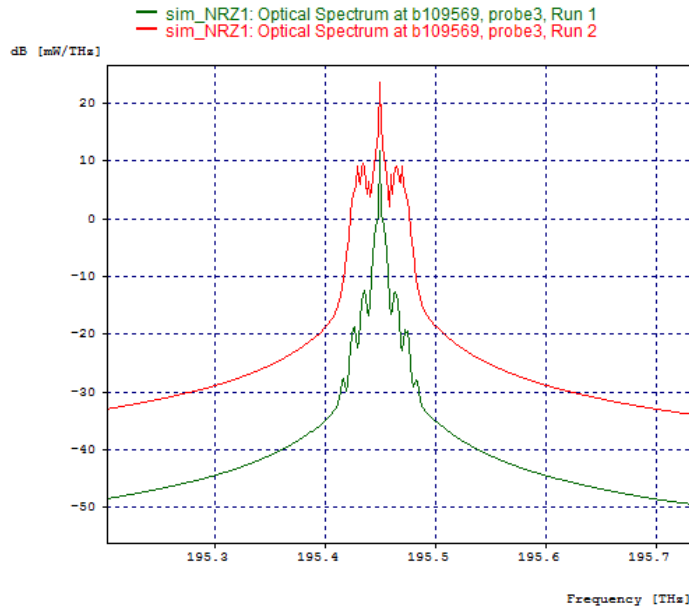


Figura 3.7 Espectro óptico del canal 1, para valores de potencia de 10 y 24dBm.

La figura 3.7 muestra el espectro óptico de la señal en dos niveles de potencia diferentes. El primero de 10dBm (verde), cumple con los parámetros de desempeño definidos y muestra como la forma del pulso no ha sido degradada a diferencia del segundo, de 24dBm (rojo), donde se evidencia el ensanchamiento del pulso ocasionado por el efecto SPM.

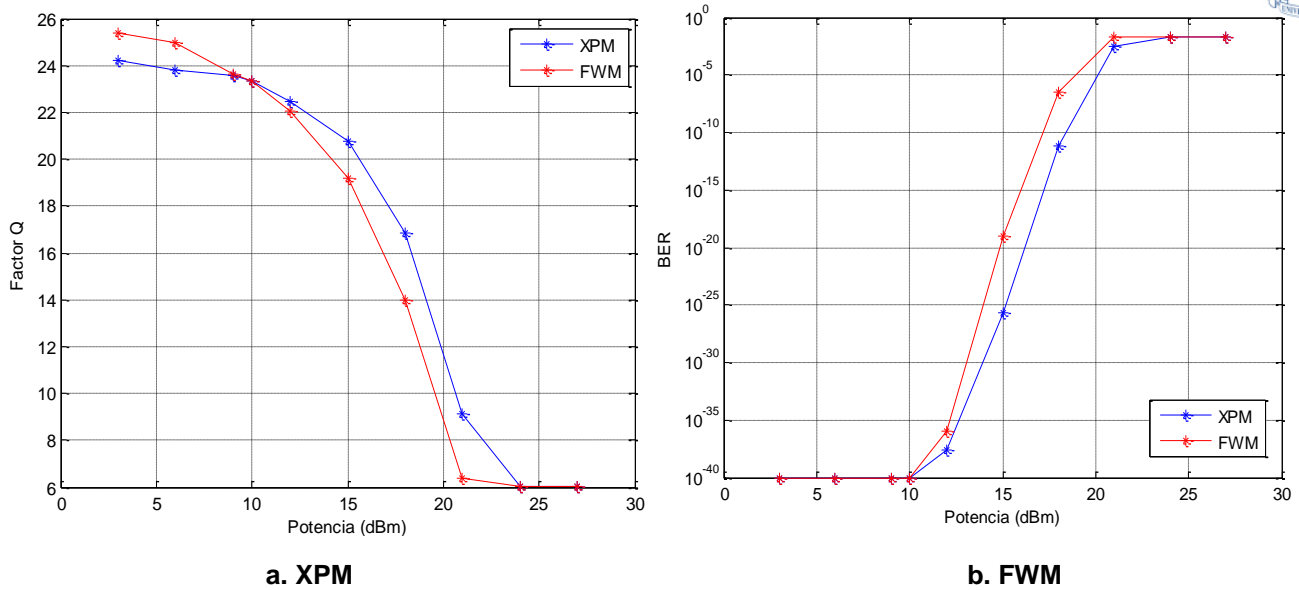


Figura 3.8 Comportamiento del canal 1, ante los efectos XPM y FWM.

En la figura 3.8, se observa la respuesta del canal 1 ante los efectos de XPM y FWM. De manera similar a lo observado para el escenario FOM-Alto, la degradación generada por ambos efectos sigue un comportamiento similar, y se evidencia que el efecto FWM impacta más la respuesta del canal 1.

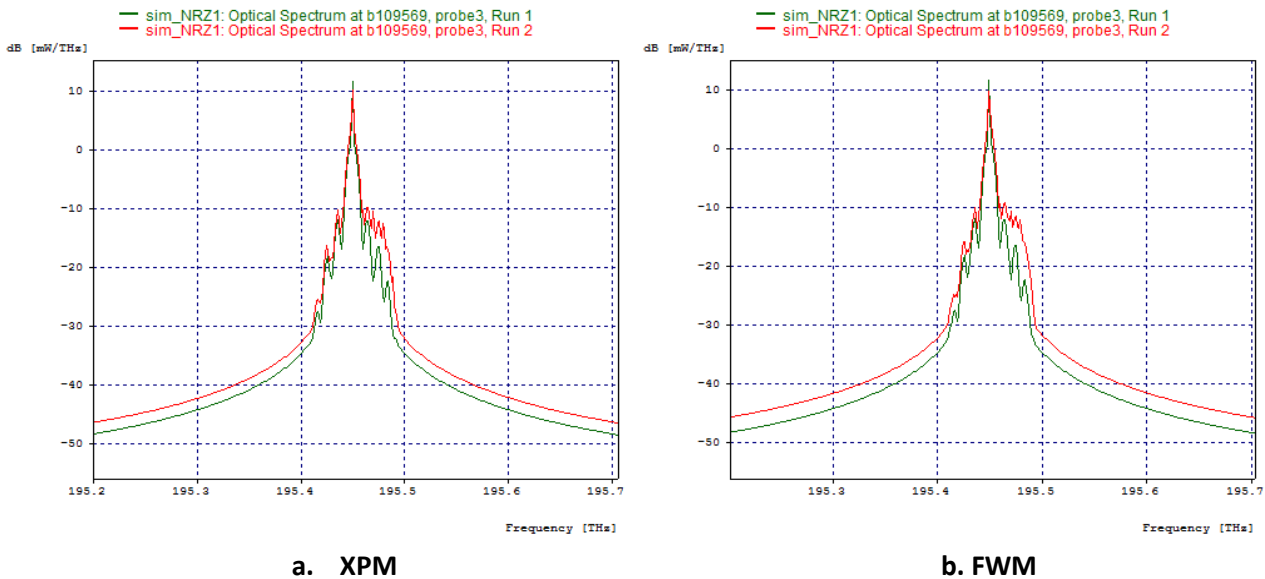


Figura 3.9 Espectro óptico del canal 1 para valores de potencia de 10 y 18dBm, de los efectos (a) XPM y (b) FWM.



La figura 3.9 muestra el espectro óptico de la señal en dos niveles de potencia diferente, 10dBm (verde) y 18dBm (rojo), para los efectos XPM y FWM respectivamente. Como se evidencia en esta figura, el ensanchamiento del pulso ocasionado por los efectos XPM y FWM no es significativo. Sin embargo, solo para el primer nivel de potencia se cumplen los parámetros de desempeño definidos.

- Prueba 2: Basados en la configuración de EDFA en pre-amplificación, se establece un span conformado por una fibra SSMF-28 de Corning, un amplificador EDFA y la DCF.

De los resultados obtenidos de esta prueba en el escenario FOM-Alto 1, se toma la potencia del EDFA en 3dBm, y dado que la longitud de la SSMF-28 de Corning encontrada en esta misma prueba coincide con la definida en el escenario de FOM-Bajo 1, dicha distancia no varía.

Tabla 3.3 Máxima distancia del enlace dependiente de la configuración del número de span y las etapas de amplificación.

Número de Span	Número de EDFA's	Distancia (Km)	BER	FACTOR Q
1	0	100	1e-40	23.363156
	1	100	1e-40	23.482994
2	2	200	1.27e-5	12.492662
3	3	300	2.28e-2	0.0241927

En la tabla 3.3, se consignan las máximas distancias que el enlace alcanza dependiendo del número de span y amplificadores implementados.

Para este escenario como se evidencia en la tabla 3.3, es posible solo utilizar un span, el cual alcanza una distancia de 100Km, con o sin el uso de un amplificador.

De los resultados obtenidos en las pruebas realizadas para los escenarios FOM-Alto 1 y FOM-Bajo 1, implementados con el formato NRZ-OOK, se concluye:

- De los tres efectos no lineales estudiados, SPM es el que más degrada la señal del canal de transmisión. No obstante, como es un efecto que se presenta en enlaces ópticos de un solo canal, no genera gran impacto para los escenarios WDM presentados.

- Se observó a lo largo de las pruebas, que los efectos XPM y FWM no generan un gran impacto sobre los escenarios WDM escogidos, por lo cual se establece que el diseño de los mismos está bien planteado para sopesar la degradación generada por los efectos no lineales estudiados.
- La implementación de etapas de amplificación genera un gran impacto sobre el diseño del enlace. Por un lado incrementa el costo del enlace y por otro lado, hace necesario la reducción de la longitud de la SSMF-28.
- De los escenarios presentados (FOM-Alto 1 y FOM-Bajo 1), se recomienda la configuración del escenario FOM-Alto 1 ya que permite alcanzar distancias de 470Km, con 4 etapas de amplificación, la cual cumple con los valores de desempeño definidos a diferencia de los 100Km sin amplificación alcanzados por el escenario de FOM-Bajo 1.

3.2 Caso 2 de simulación. Formato de modulación RZ-DPSK

A continuación se desarrollan las pruebas para evaluar los efectos no lineales y la implementación de etapas de amplificación en los escenarios FOM-Alto 2 y de FOM-Bajo 2:

3.2.1 Escenario FOM-Alto 2.

- Prueba 1: A continuación se muestran los resultados obtenidos del análisis de los efectos no lineales.

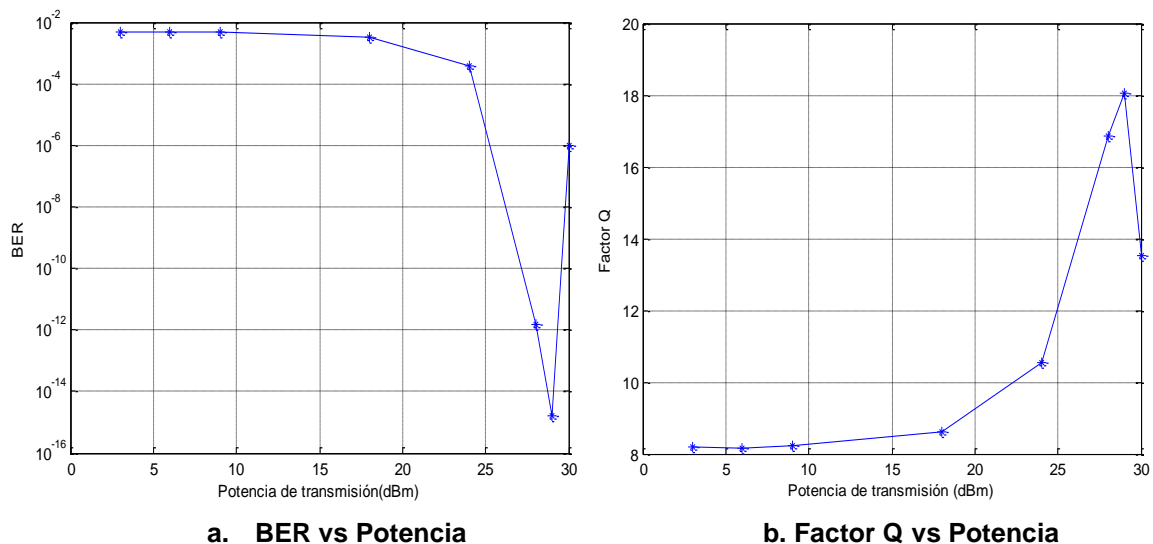


Figura 3.10 Comportamiento del canal 1, ante la variación de potencia de transmisión.



La figura 3.10, muestra que a medida que la potencia aumenta, el desempeño del canal empieza a mejorar hasta alcanzar en una potencia de 29dBm los valores de BER y factor Q definidos, luego empieza a decrecer haciéndose evidente el efecto SPM.

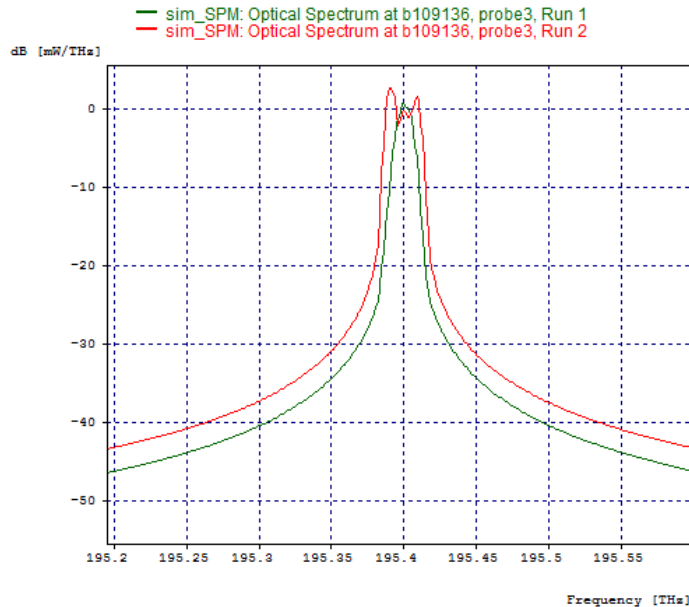


Figura 3.11 Espectro óptico del canal 1, para valores de potencia de 29 y 30dBm.

La figura 3.11 muestra el espectro óptico de la señal para dos niveles de potencia diferentes. El primero de 29dBm (verde), valor para el cual el enlace cumple con los parámetros de desempeño definidos y el segundo de 31dBm (rojo), valor en el cual se evidencia el ensanchamiento del pulso ocasionado por el efecto SPM.

En la figura 3.12, se observa la respuesta del canal 1 ante los efectos de XPM y FWM. Debido a que estos se presentan en sistemas de más un canal (WDM), a diferencia del efecto SPM generado en sistemas de un solo canal, se combinan en una misma gráfica a fin de comparar el nivel de degradación que generan estos dos efectos.

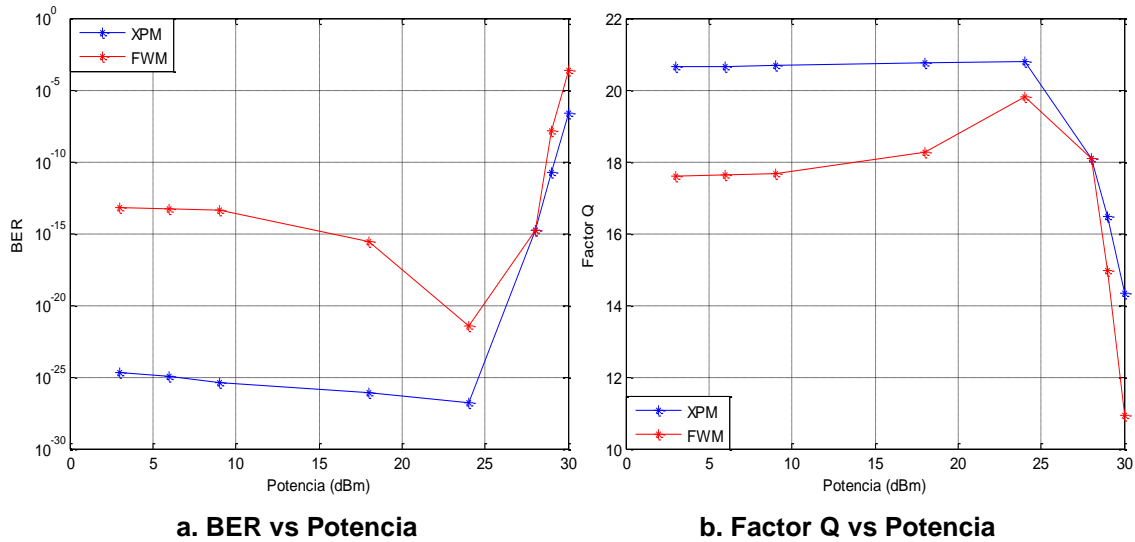


Figura 3.12 Comportamiento del canal 1, ante los efectos XPM y FWM.

En la figura 3.12, se evidencia que a pesar de que la degradación generada por ambos efectos sigue un comportamiento similar, es notable que el efecto FWM impacta más la respuesta del canal 1.

En un rango de potencia entre 3-28dBm, para ambos efectos, el enlace permanece estable cumpliendo con los valores de BER y Factor Q definidos. Valores superiores de potencia afectan el canal incrementando la degradación generada por XPM y FWM.

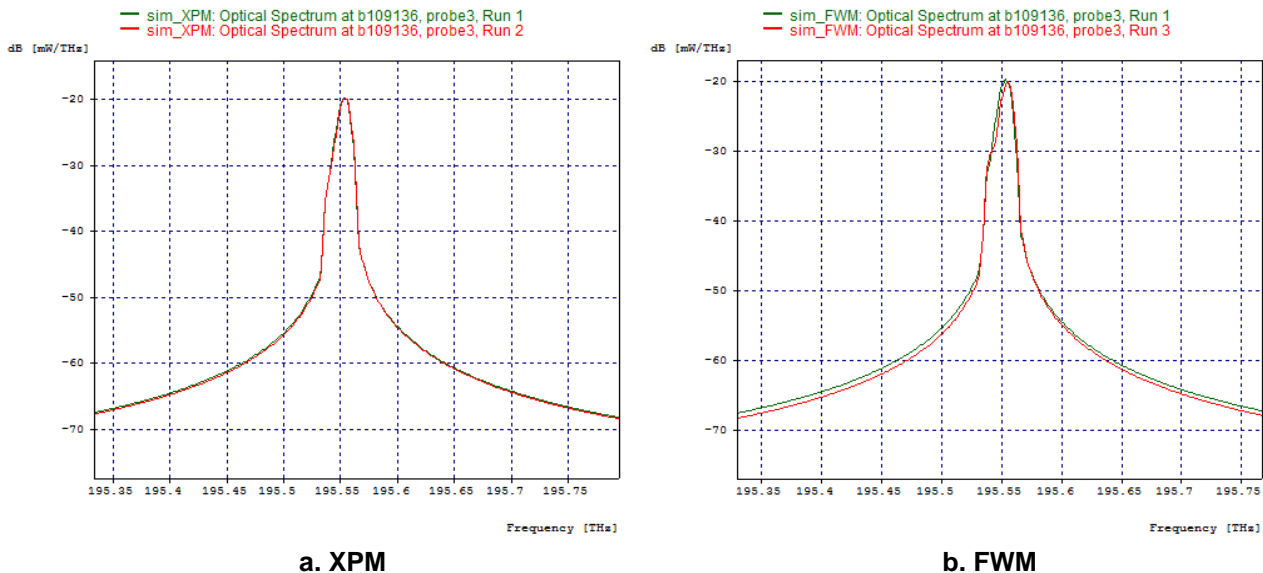


Figura 3.13 Espectro óptico del canal 1, para valores de potencia de 10 y 15dBm. De los efectos (a) XPM y (b) FWM.



La figura 3.13 muestra el espectro óptico de la señal en dos niveles de potencia diferentes, para los efectos XPM y FWM respectivamente. El primer nivel de potencia igual a 28dBm (verde), valor para el cual el enlace cumple con los parámetros de desempeño definidos y el segundo de 29dBm (rojo) aunque presenta valores de desempeño mayores a los definidos, no evidencia un ensanchamiento considerable del pulso. Como se mencionó los dos efectos degradan de manera similar el canal 1, dado esto los niveles de potencia a los que se presentan las degradaciones son iguales, este hecho se evidencia en las figuras a. y b.

- Prueba 2: Se busca la distancia máxima del enlace mediante la implementación de varias etapas de amplificación. Para ello se han realizado pruebas para determinar el tipo de amplificadores a utilizar; Raman, EDFA en pre-amplificación o EDFA Inline, variando la potencia de 0 - 12dBm, presentando los EDFA el mejor desempeño, sin embargo, a pesar de que las configuraciones en pre-amplificación e Inline presentan resultados muy similares de BER y Factor Q se opta por escoger EDFA en Pre-amplificación a una potencia de 12dBm. Anexo A.

A continuación se presentan las pruebas al implementar las etapas de amplificación en el enlace.

Con el fin de obtener la máxima distancia del enlace, se hace necesario reducir la longitud de la SSMF-28 de Corning como se muestra en la figura 3.14 e implementar varios span.

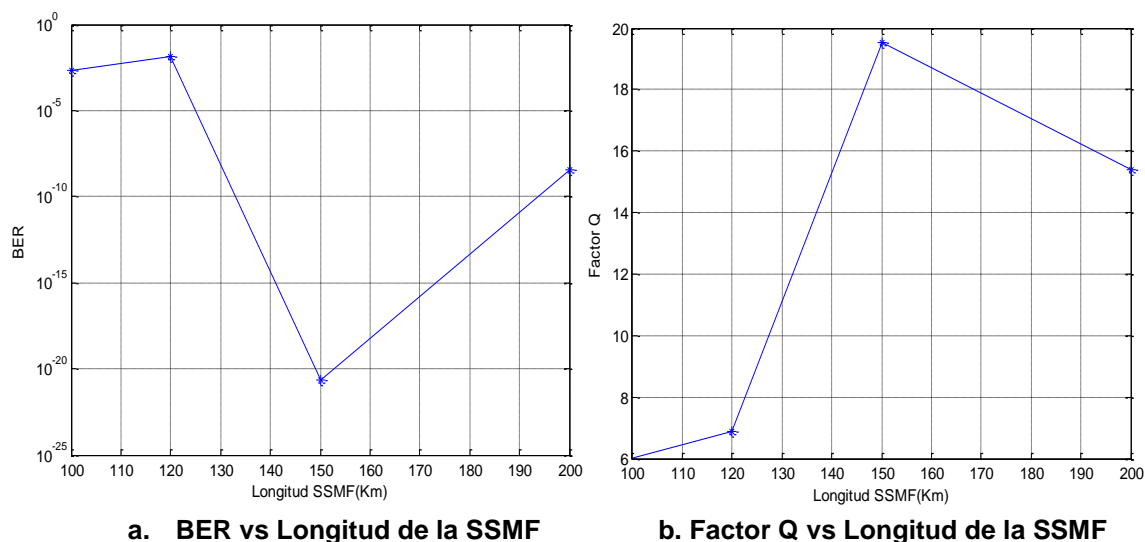


Figura 3.14 Longitud máxima de la SSMF para un span.



En la figura 3.14 se evidencia el comportamiento del enlace ante la variación de la longitud de la SSMF-28 de Corning, entre 100 y 200Km de un span, presentando el mejor rendimiento en 150Km.

Tabla 3.4 Máxima distancia del enlace dependiente de la configuración del número de span y las etapas de amplificación.

Número de Span	Número de EDFA's	Longitud SSMF (Km)	BER	Factor Q (dB)
1	0	150	1e-40	23.173532
	1	150	3.41642e-39	22.317333
2	2	300	2.41885e-21	19.542264
3	3	450	1.58576e-8	15.171857

La tabla 3.4 muestra la máxima distancia que el enlace alcanza con diferentes etapas de amplificación. El sistema solo soporta dos logrando una distancia de 300Km.

3.2.2 Escenario de FOM-Bajo 2.

- Prueba 1: A continuación se muestran los resultados obtenidos de la simulación de los efectos no lineales:

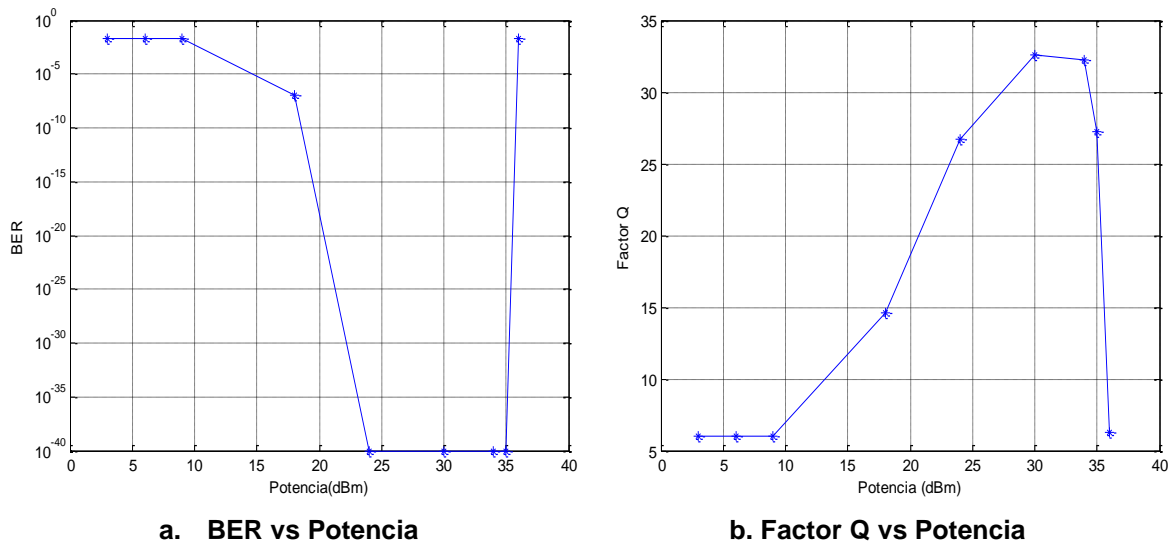


Figura 3.15 Comportamiento del canal 1, ante la variación de potencia de transmisión.

La figura 3.15, muestra el desempeño del canal 1 ante la variación de la potencia de transmisión. A medida que la potencia aumenta, el canal empieza a



mejorar hasta que encuentra un rango estable de buen rendimiento (25 - 35dBm). En valores superiores de potencia empieza a hacerse evidente el efecto SPM, volviéndose crítico para valores mayores a 35dBm.

La figura 3.16 muestra el espectro óptico de la señal en dos niveles de potencia diferentes. El primero de 35dBm (verde), valor para el cual el enlace cumple con los parámetros de desempeño definidos y el segundo de 36dBm (rojo), valor en el que se presenta un ensanchamiento del pulso ocasionado por el efecto SPM.

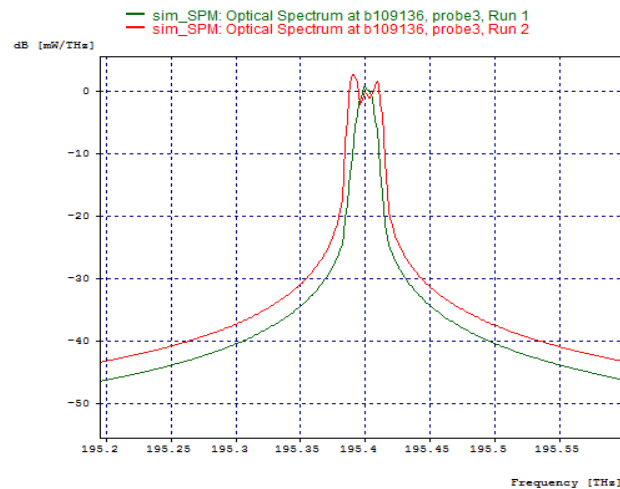


Figura 3.16 Espectro óptico del canal 1, para valores de potencia de 10 y 24dBm.

En la figura 3.17, se observa la respuesta del canal 1 ante los efectos de XPM y FWM. De manera similar a lo observado para el escenario FOM-Alto 2, la degradación generada por ambos efectos sigue un comportamiento similar, y se evidencia que el efecto FWM impacta más la respuesta del canal 1.

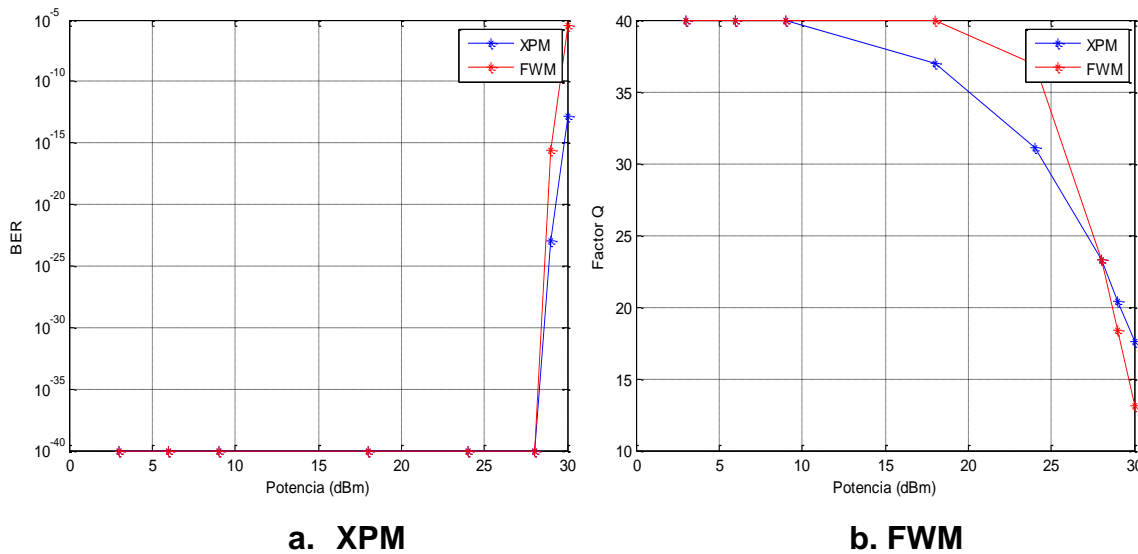


Figura 3.17 Comportamiento del canal 1, ante los efectos XPM y FWM.

La figura 3.18 muestra el espectro óptico de la señal en dos niveles de potencia diferentes, para los efectos XPM y FWM respectivamente. El primer nivel de potencia igual a 29dBm (verde), valor para el cual el enlace cumple con los parámetros de desempeño definidos y el segundo de 30dBm (rojo) aunque presenta valores de desempeño mayores a los definidos, no evidencia un ensanchamiento considerable del pulso. Como se mencionó los dos efectos degradan de manera similar el canal 1, dado esto los niveles de potencia a los que se presentan las degradaciones son iguales, este hecho se evidencia en las figuras a. y b.

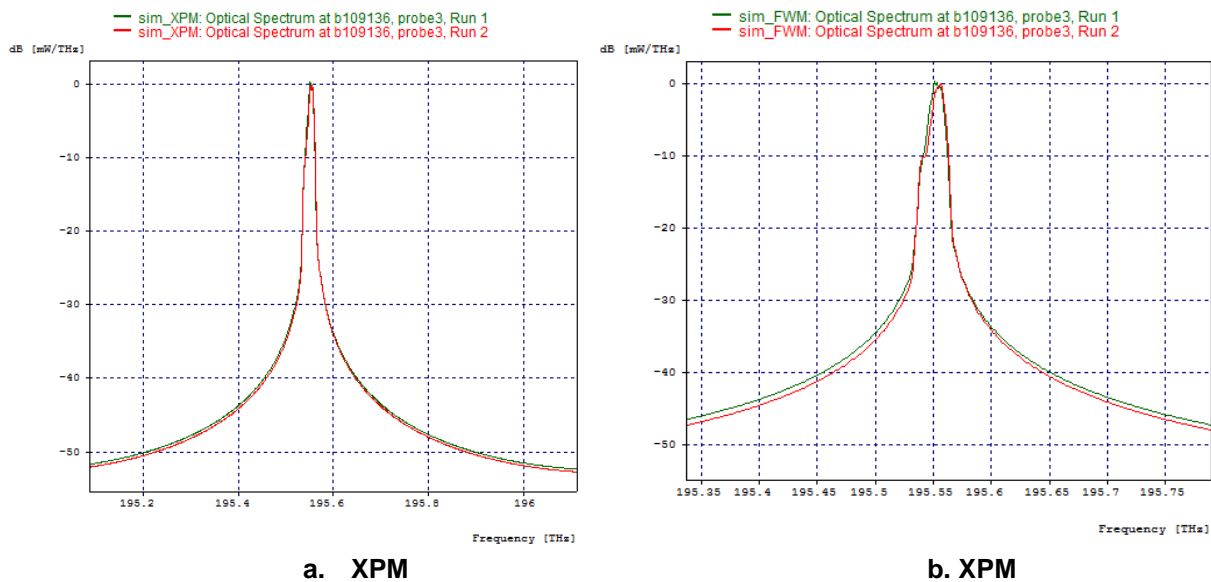


Figura 3.18 Espectro óptico del canal 1, para valores de potencia de 29 y 30dBm.



- Prueba 2: De manera similar al escenario FOM-Alto 2 se configura en cada span un amplificador EDFA en pre-amplificación con una potencia de 12dBm. A fin de buscar máxima distancia del enlace.

A continuación se presenta la prueba realizada para buscar la longitud adecuada de la SSMF para 2 span:

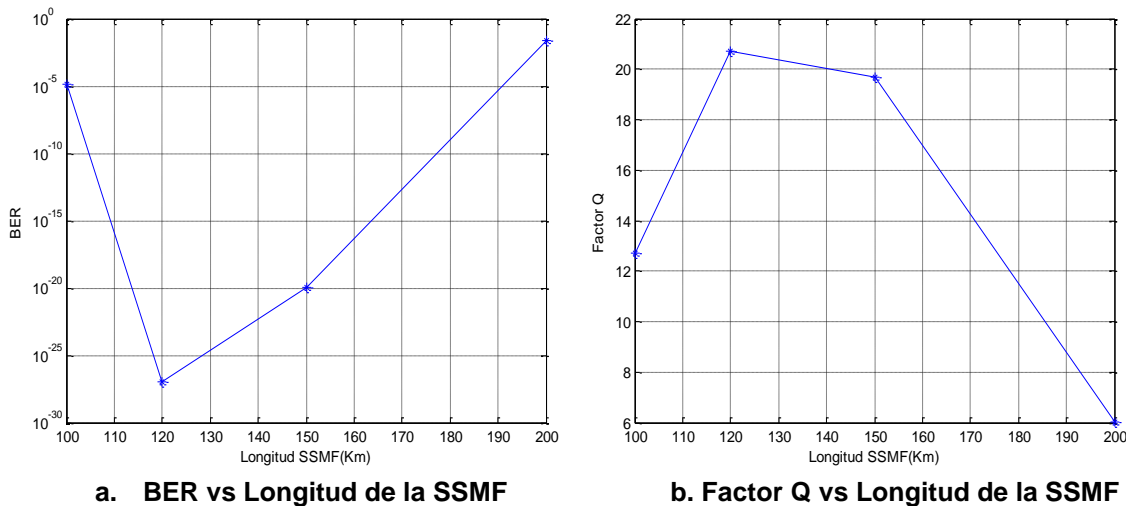


Figura 3.19 Longitud máxima de la SSMF para un span.

En la figura 3.19 se evidencia el comportamiento del enlace ante la variación de la longitud de la SSMF-28 de Corning, entre 100 y 200Km, presentando el mejor rendimiento en 120Km.

Tabla 3.5 Máxima distancia del enlace dependiente de la configuración del número de span y las etapas de amplificación.

Número de Span	Número de EDFA's	Longitud SSMF (Km)	BER	Factor Q (dB)
1	0	120	1e-40	22.666.470
	1	120	1.22338e-35	21.874922
2	2	240	1.14201e-27	20.735220
3	3	360	3.37416e-25	20.445325
4	4	480	1.94818e-25	20.314016
5	5	600	3.37568e-18	18.952668
6	6	720	3.5899e-16	18.258927
7	7	840	2.79841e-14	17.602263

En la tabla 3.5, se consignan las máximas distancias que el enlace alcanza dependiendo del número de span y amplificadores implementados.



Para este escenario como se evidencia en la tabla 3.5, es posible implementar 7 span, los cuales alcanzan una distancia máxima de 720Km.

Finalmente, de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas para los escenarios FOM-Alto 2 y FOM-Bajo 2, implementados con el formato RZ-DPSK, se concluye:

- De igual manera que en el formato de modulación NRZ-OOK, de los tres efectos no lineales analizados, SPM es el que más degrada la señal del canal de transmisión. No obstante, como es un efecto que se presenta en enlaces ópticos de un solo canal, no genera gran impacto para los escenarios WDM presentados.
- Se observó a lo largo de las pruebas, que el diseño de los escenarios FOM-Alto 2 y de FOM-Bajo 2 planteados son adecuados para sopesar la degradación generada por los efectos no lineales XPM y FWM.
- La implementación de etapas de amplificación genera un gran impacto sobre el diseño del enlace, permiten alcanzar grandes distancias aunque esto conlleva al incremento de los costos.
- De los escenarios presentados (FOM-Alto 2 y FOM-Bajo 2), se recomienda la configuración del escenario FOM-Alto 2, si no se desea utilizar amplificadores ya que este permite alcanzar distancias de 250Km en un solo span. Por el contrario se desean distancias alrededor de los 720Km es recomendable a implementación del escenario de FOM-Bajo 2.

Como se mencionó en la generación de escenarios y casos de simulación, las configuraciones realizadas son de tipo incremental, esto conduce a recolectar, tras cada prueba, los mejores resultados con los cuales han sido caracterizados los escenarios que se presentan en la tabla 3.6. Como se evidencia para el formato de modulación NRZ-OOK el escenario de FOM-Alto, así mismo para el formato de modulación RZ-DPSK el escenario de FOM-Bajo sombreados de color verde, son los escenarios recomendados a hacer implementados en sistemas WDM con DCF. Estos escenarios han sido escogidos como los mejores, gracias a que permite duplicar la capacidad de transporte, alcanzar grandes distancias, implementar potencias típicas promedio de 10 y 28 dBm, sin que estos sean degradados por los efectos no lineales.



Tabla 3.6 Comparación de los escenarios de FOM-Alto y FOM-Bajo de los formatos NRZ-OOK yRZ-DPSK

ESCENARIOS		PROPIEDADES DE LA DCF Y PARÁMETROS DEL SISTEMA WDM							
		Propiedades de la DCF	Potencia de transmisión (dBm)	Distancia sin amplificación (Km)	Espaciament o entre canales (Ghz)	Tipo de amplificación	Número de span/ posibles etapas de amplificación	Principal efecto no lineal	Distancia total con amplificación
NRZ-OOK	Alto	Atenuación = 0.235	10	142	50	EDFA en Pre-Amplificación	5/4	FWM	470
		Coefficiente de dispersión = -250							
		FOM = 1063,82							
	Bajo	Atenuación = 0.235	10	100	50	EDFA en Pre-Amplificación	1/0	FWM	100
		Coefficiente de dispersión = -120							
		FOM = 510,6							
RZ-DPSK	Alto	Atenuación = 0.55	28	250	50	EDFA en Pre-Amplificación	2/2	FWM	300
		Coefficiente de dispersión = -333							
		FOM = 605,454							
	Bajo	Atenuación = 0.55	28	150	50	EDFA en Pre-Amplificación	6/6	FWM	720
		Coefficiente de dispersión = -250							
		FOM = 454,54							



CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

En este capítulo se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros, resultado del desarrollo de este trabajo de grado. Las conclusiones están basadas en los objetivos a alcanzar y el desarrollo de los mismos registrado en este documento.

Las recomendaciones se dan sobre la metodología seguida para el desarrollo del presente trabajo y de los desafíos encontrados; los trabajos futuros sobre la simulación y otro tipo de análisis que se puede realizar sobre los sistemas de fibra en sistemas WDM.

4.1 Conclusiones

- Las propiedades de la DCF generan un impacto importante sobre el desempeño del enlace, induciendo a modificaciones sobre diferentes parámetros de diseño, tales como la distancia del enlace, la potencia de transmisión, el espaciamiento entre canales y el uso de amplificadores.
- La atenuación presente en la DCF impacta el diseño del enlace, en aspectos como la variación de potencia, reducción de la longitud de la fibra, y el requerimiento de etapas de amplificación cuando se usa el formato NRZ-OOK.
- Reducir el coeficiente de dispersión de la DCF, permite duplicar la capacidad del enlace para los dos formatos de modulación estudiados. Adicionalmente, permite aumentar las distancias del enlace alcanzadas en cada formato, siendo mayor para el formato RZ-DPSK.
- El desempeño de un enlace en un sistema WDM mejora al tener una adecuada relación entre el coeficiente de dispersión y la longitud de la DCF.
- Un alto valor de FOM de la DCF, permite diseñar enlaces de grandes distancias sin el uso de amplificación, contrario a lo que sucede con valores bajos de FOM que ocasionan disminución en la longitud de la fibra por span, pero que permiten hacer uso de etapas de amplificación que logran distancias totales superiores a la distancia establecida para sistemas WDM MAN en el formato de modulación RZ-DPSK.



- Es necesario definir un adecuado nivel de potencia para alimentar el enlace de comunicación, pues de no hacerlo se pueden tener efectos no lineales que degraden su desempeño.
- Utilizar el formato RZ-DPSK junto con compensación de la dispersión mediante un DCF, permite alcanzar una distancia superior a la lograda con el formato NRZ-OOK.

4.2 Recomendaciones

- La literatura en el campo de las comunicaciones ópticas recomienda que para obtener resultados altamente confiables se deben ejecutar simulaciones con un número de muestras igual o mayores a 2048 y tiempos de simulación iguales a 200 ns, sin embargo es recomendable que este número de muestras este por debajo de los valores indicados, con el fin de evitar tiempos de simulación muy extensos. De acuerdo a la evaluación realizada en el presente trabajo de grado se recomiendan los siguientes valores: 128 muestras y 70 ns de tiempo de simulación.
- Antes de iniciar cualquier proceso de simulación, es necesario que se defina una metodología de simulación, pues así se garantiza la obtención de resultados claros y ajustados al contexto del proyecto que se va a desarrollar.
- Para el proceso de diseño de un sistema WDM, a nivel teórico, se deben identificar y definir los parámetros que se ven afectados por las propiedades de la DCF, con el fin de cargar la simulación de múltiples parámetros que no generen un aporte al análisis.
- En procesos de simulación de esta naturaleza, se recomienda implementar escenarios de simulación de tipo incremental, ya que permite ver la evolución de los mismos e ir ajustando valores para cada parámetro, lo que lleva a la obtención de una solución de diseño apropiada.



4.3 Trabajos Futuros

A través del cumplimiento de los objetivos del trabajo de grado, fue posible identificar nuevas investigaciones concernientes al análisis del impacto de las propiedades de la DCF en el diseño de sistemas WDM. Estas son:

- Analizar la posible degradación generada en enlaces ópticos que implementan amplificación, EDFA o un amplificador RAMAN.
- Trabajar con otros formatos de modulación para el comportamiento del sistema ante la compensación de la dispersión mediante una DCF, para generar una amplia comparación que permita elegir el formato más adecuado según las características del sistema.
- Analizar el impacto de las propiedades de una DCF en sistemas WDM, con velocidades de transmisión superiores a 10Gbps.
- Realizar un estudio analítico de los algoritmos y métodos utilizados por la herramienta Optsim de RSOFT para la obtención de resultados, y comparar estos con los resultados obtenidos mediante simulación.
- Realizar una comparación entre sistemas WDM sin y con compensación de la dispersión con DCF, fibras Bragg o nuevos dispositivos de compensación.



REFERENCIAS

- [1] Mamyshev, P., *et al.*, "40-Gb/s upgradability of 10-GB/S systems," 2004, pp. 23-24.
- [2] Gaxiola, O. I., "Simulador de un sistema de comunicación óptico empleando multicanalización por división de longitudes de onda (WDM)," Maestría., Instituto Politécnico Nacional, Tijuana, Mexico 2005.
- [3] Grote, W., *et al.*, "Desarrollo de una red experimental IP/WDM.," *Red Optica Reuna.*, 2002.
- [4] Rahman, A., "A Review of DWDM, The Heart of Optical Networks," ed.
- [5] Orozco, H. F. B. and Trujillo, W. D. J., "Multiplexación por división de longitud de Onda-WDM Una nueva alternativa para comunicaciones ópticas* Wavelength Division Multiplexing–WDM a new alternative for optical communications."
- [6] *Spectral grids for WDM applications: CWDM Wavelength grid. G.694.2*, ITU-T, 2003.
- [7] *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. G.694.1*, ITU-T, 2012.
- [8] Millan, R. J., "WDM Corrige las limitaciones de la fibra," *Redes & Telecom*, vol. 201, Abril 2006 2006.
- [9] Techonologies, H., "WDM Principle," Huawei.
- [10] Pinto, J., *et al.*, "DWDM em Redes Metropolitanas," *CBPF*, 2002.
- [11] Mostert, W., *et al.*, "O Band WDM Expand Capacity without adding new fiber," *Communications Technology*, 2008.
- [12] Escobar, S. P. and Martinez, C. Y., "Title," unpublished |.
- [13] Millan, R. J., "Redes DWDM Metropolitanas," *Comunicaciones World*, vol. 164, 2002.
- [14] PRESS, C., "Introduction to DWDM Technology," ed: Indianápolis-USA, 2001.
- [15] Inc., C. S., "Introduction to DWDM for Metropolitan Networks," ed, 2000.
- [16] Grijalba, J. F. and Gomez, G. A., "Análisis del Desempeño de Formatos de Modulación en Comunicaciones Ópticas Sobre Redes WDM," Pregrado, Universidad del Cauca, 2010.
- [17] Chomycz, B., *Planning fiber optics networks*: McGraw-Hill Professional, 2009.
- [18] Tripathi, R. and Singh, N., "Ultra high speed long-haul WDM link design considerations," *Journal of optical communications*, vol. 28, pp. 58-65, 2007.
- [19] Inc., C. S., "Anexo C: Introduccion a la Tecnologia WDM," ed, 2010, pp. 139-150.
- [20] Telnet, "Fibra optica para NGN - Dispersion cromatica y PMD," Zaragoza-España, 2009.
- [21] Agrawal, G. P., *Fiber-optic communication systems* vol. 222: Wiley, 2012.
- [22] *Characteristic of a Single-mode Optical Fibre cable. G.652*, ITU-T, 2000.
- [23] Gumaste, A. and Antony, T., *DWDM network designs and engineering solutions*: Cisco Systems, 2003.
- [24] Sanz, M. A. R., "Amplificadores de Fibra Optica," Academia de Ciencias exactas, físicas químicas y naturales de Zaragoza 2000.
- [25] Nertworks, P. L. (2000). *DWDM Booster Inline and Pre-Amplifier EDFA Solution*. Available: www.packetlight.com, [January 15]
- [26] Chan, C. C. K., *Optical performance monitoring: advanced techniques for next-generation photonic networks*: Academic Press, 2010.
- [27] Ramaswami, R., *et al.*, *Optical networks: a practical perspective*: Morgan Kaufmann, 2009.
- [28] Grosz, D. F., "Sistemas de Comunicación por Fibra Óptica de Alta Capacidad," ed: Publicación CREDI (Centro de Recursos Documentales e Informáticos) No, 2004.
- [29] Thyagarajan, K., *et al.*, "Effects of Nonlinearity and Polarization Mode Dispersion on High Bit-rate Fiber-optic Communication Links," 2004.
- [30] Inc., C. S., "Optical DWDM Fundamentals," ed, 2007.



- [31] Morocho, S. and Elizabeth, C., "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," 2009.
- [32] Llanos, F. and del Rocío, C., "Diseño de la red de transporte alternativa para tráfico internacional de TRANSELECTRIC SA con tecnología DWDM," 2007.
- [33] López Perafán, J. G., et al., "Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM," *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC*, vol. 20, pp. 23-35, 2011.
- [34] López Perafán, J. G., et al., "Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM," *Facultad de Ingeniería*, vol. 20, pp. 23-35, 2011.
- [35] Skarica, C., "The road from 10G to 40G to 200G DWDM Networks," HUAWEI, Ottawa, Ontario 2010.
- [36] Agredo, J. and H. Ordonez, "Análisis del desempeño de redes WDM frente a variaciones en los parámetros de transmisión y su incidencia en los efectos no lineales," Pregrado, Universidad del Cauca, 2012.
- [37] Singh, M., et al., "Optimizing amplifier spacing to improve performance in RZ-rectangular pulse based 10Gb/s single channel dispersion managed optical communication system," *Optics Communications*, vol. 281, pp. 5811-5818, 2008.
- [38] Wood, R., "Next-Generation Network Services," ed: Cisco, 2005.
- [39] *Characteristics of a dispersion-shifted, single-mode optical fibre and cable. G-653*, ITU-T, 2010.
- [40] *Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre cable. G.654*, ITU-T.
- [41] *Characteristics of a non-zero dispersion shifted single-mode optical fibre cable. G.655*, ITU-T.
- [42] Hu, B., et al., "Analysis on dispersion compensation with DCF based on Optisystem," 2010, pp. 40-43.
- [43] Abellán, D. P., et al., *Sistemas de comunicaciones ópticas*: Ed. Univ. Politéc. Valencia, 2007.
- [44] Audet, F., "Dispersion-Compensating Fiber: Precision and Repetition," EXFO, Canada.
- [45] Slavov, D., "Chromatic dispersion compensation in conventional single-mode fibers," Department of Telecommunications, University of Varna, Bulgaria.
- [46] Hecht, J. and Long, L., *Understanding fiber optics* vol. 3: Prentice Hall Columbus, 2006.
- [47] Grüner-Nielsen, L., et al., "Dispersion compensating fibers," *Lightwave Technology*, vol. 23, pp. 3566-3579, 2005.
- [48] Hirano, M., et al., "DCF module with low insertion loss, small residual dispersion, and low PMD," in *OSA/OFC/NFOEC*, 2009, pp. 1-3.
- [49] Ramachandran, S., et al., "Fiber designs for high figure of merit and high slope dispersion compensating fibers," *Fiber Based Dispersion Compensation*, vol. 5, pp. 7-42, 2007.
- [50] Kaminow, I. P., et al., *Optical fiber telecommunications VA: Components and Systems* vol. 2: Academic Press, 2008.
- [51] Toledo, J. A. R. and Melo, D. F., "Análisis De Desempeño De Diferentes Técnicas De Compensación Ópticas Y Electrónicas Para La Dispersión Cromática En Redes WDM," Pregrado, Universidad del Cauca, 2011.
- [52] Oser, S. M., "Basic Descriptive Statistics and Probability Distributions," ed, 2011.
- [53] Singh, M., et al., "Investigations on order and width of RZ super Gaussian pulse in pre-, post-and symmetrical-dispersion compensated 10Gb/s optical communication system



- using standard and dispersion compensating fibers," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 121, pp. 609-616, 2010.
- [54] Arora, O., *et al.*, "Symmetrical Dispersion Compensation For High Speed Optical Links," *arXiv preprint arXiv:1112.2058*, 2011.
- [55] Pal, R. and Sharma, V., "Comparison of Pre-, Post-and Symmetrical-dispersion Compensation Schemes for 10/15 GBPS using Different Modulation Formats at Various Optical Power Levels using Standard and Dispersion Compensated Fibers," *International Journal of Computer Applications*, vol. 50, pp. 6-13, 2012.
- [56] Mynbaev, D. K. and Scheiner, L. L., *Fiber-optic communications technology*: Prentice Hall 2001.
- [57] Ulgen, O. M., *et al.*, "SIMULATION METHODOLOGY--A PRACTITIONER'S PERSPECTIVE," ed: Michigan Simulation User Group, Technical Committee on Simulation Methodology. <http://www.pmc.com/>, Dearborn, 2000.
- [58] Catalunya, U. P. d., "OPNET: Manual de Usuario," ed, 2004.