

0058484

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA MIGRACIÓN DE LOS SISTEMAS DWDM QUE OPERAN
A 2.5G Y 10G A SISTEMAS DE 40G Y 100G**

PRESENTADO POR:

Albaro Danilo López Villegas

Para ascender a profesor AGREGADO

Caracas, 2014



UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
DECANATO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
COORDINACIÓN DOCENTE DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIONES
ESPECIALIZACIÓN EN TELEMÁTICA

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA MIGRACIÓN DE LOS
SISTEMAS DWDM QUE OPERAN A 2.5G Y 10G A SISTEMAS DE 40G
Y 100G**

por

Albaro Danilo López Villegas

Julio 2014



UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
DECANATO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
COORDINACIÓN DOCENTE DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIONES
ESPECIALIZACIÓN EN TELEMÁTICA

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA MIGRACIÓN DE LOS
SISTEMAS DWDM QUE OPERAN A 2.5G Y 10G A SISTEMAS DE 40G
Y 100G**

Trabajo Especial de Grado presentado a la Universidad Simón Bolívar por

Albaro Danilo López Villegas

como requisito parcial para optar al grado académico de

Especialista en Telemática

con la asesoría de la Prof.

Mónica Karel Huerta

Julio 2014



UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
DECANATO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
COORDINACIÓN DOCENTE DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIONES
ESPECIALIZACIÓN EN TELEMÁTICA

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA MIGRACIÓN DE LOS
SISTEMAS DWDM QUE OPERAN A 2.5G Y 10G A SISTEMAS DE 40G
Y 100G

Por: López Villegas Albaro Danilo
Carnet No.: 1188278

Este Trabajo Especial de Grado ha sido aprobado en nombre de la
Universidad Simón Bolívar por el siguiente jurado examinador:

Prof. Ricardo González
Presidente

Prof. Eduardo Blanco
Miembro Principal

Prof. Mónica Karel Huerta
Miembro Principal-Tutor

04 de Julio de 2014

DEDICATORIA

A mis hijas Alba y Andrea, el mayor tesoro que me ha regalado la vida.

AGRADECIMIENTO

Quisiera agradecer al Ingeniero Alejandro Uribe, Gerente de Recursos del Centro de Entrenamiento para la Región Andina de la empresa Huawei Technologies Co., Ltd, por su valiosa colaboración, la cual fue de gran ayuda para hacer posible la realización de este trabajo.



UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR
DECANATO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
COORDINACIÓN DOCENTE DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIONES
ESPECIALIZACIÓN EN TELEMÁTICA

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA MIGRACIÓN DE LOS
SISTEMAS DWDM QUE OPERAN A 2.5G Y 10G A SISTEMAS DE 40G
Y 100G**

Por: López Villegas Albaro Danilo
Carnet No.: 1188278
Tutor: Prof. Mónica Karel Huerta
Enero 2014

RESUMEN

En el presente trabajo se presenta una propuesta de factibilidad para la migración de los sistemas que operan actualmente con tecnologías de Multiplexación Densa por División de Longitud de Onda (DWDM), con tasas de transmisión de 2,5G y 10G (Gbps), a sistemas con velocidades de 40G y 100G, sobre fibras ópticas bajo los estándares ITU-T G.652, G.653 y G.655. Para lograr el objetivo se han revisado algunas de las especificaciones técnicas de organismos normativos de estándares como la *International Telecommunications Union* (ITU), el *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) y el *Optical Internetworking Forum* (OIF), así como distintos libros, publicaciones, *white papers*, información técnica de fabricantes de equipos, etc. que hablan sobre el estado del arte de la tecnología DWDM a 40G y 100G, su desarrollo, implementaciones y pruebas de campo en distintas administraciones a nivel mundial, que sirven de referencia para ser aplicadas en nuestro país. El estudio reúne las posibles opciones tecnológicas existentes en el mercado, para solventar los problemas técnicos que se presentan con la evolución de sistemas DWDM a velocidades superiores a 10G en los distintos tipos de fibra óptica, y así poder migrarlos a 40G y 100G, sólo con la sustitución de las unidades Transpondedoras y sin realizar mayores cambios en el resto del sistema. Se espera que el mismo sirva de guía para los operadores de telecomunicaciones del país, a fin de que puedan responder a las necesidades de incremento de ancho de banda en sus redes de transporte, haciendo un uso más eficiente de sus recursos físicos instalados y sin afectar la calidad de los servicios que actualmente prestan.

Palabras claves: Fibra óptica, DWDM, Migración, Análisis tecnológico.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
APROBACIÓN DEL JURADO.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
RESUMEN.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	5
1.1 Características de un Sistema DWDM.....	5
1.2 Componentes de un sistema DWDM.....	8
1.3 Tipos de Fibra.....	12
1.4 Fenómenos que afectan la propagación de la Luz en la fibra.....	15
1.4.1 Atenuación.....	15
1.4.2 Dispersión cromática.....	16
1.4.3 Dispersión de Modo de Polarización.....	18
1.4.4 Efectos no-lineales.....	19
1.5 Esquemas de modulación utilizados en los sistemas DWDM actuales.....	20
1.5.1 Técnicas de modulación.....	21
1.5.2 Formatos de modulación.....	22
1.6 Evolución hacia los sistemas de 40 y 100G.....	23
1.7 Técnicas para contrarrestar los factores de restricción a 40 y 100G.....	25
1.7.1 ODB (Optical Duobinary).....	25
1.7.2 DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying).....	27
1.7.3 DP-QPSK (Dual Polarization- Quadrature Phase Shift Keying).....	28
1.7.4 Detección coherente.....	29

1.7.5	FEC (Forward Error Correction).....	32
CAPITULO II: ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL		34
2.1	Descripción de las redes de Transmisión por fibra óptica.....	34
CAPÍTULO III: PROPUESTA DE MIGRACIÓN A 40G Y 100G		40
3.1	Antecedentes para la migración	40
3.2	Escenario de migración a 40G.....	41
3.2.1	La tolerancia a la Dispersión Cromática (CD).....	43
3.2.2	La tolerancia a la Dispersión de Modo de Polarización (PMD)	46
3.2.3	La eficiencia espectral y la OSNR	47
3.2.4	Los efectos no lineales	50
3.3	Hacia los 100G	52
3.3.1	Factores de restricción para la transmisión a 100G y técnicas utilizadas para contrarrestar los mismos.	53
CAPÍTULO IV: RESULTADOS		58
4.1	Objetivo de la prueba	58
4.2	Configuración del equipamiento utilizado	58
4.3	Procedimiento.....	61
4.3.1	Medición del ancho espectral de señales de 10G y 40G.....	62
4.3.2	Simulación de un sistema híbrido DWDM de 10G y 40G	65
4.4	Análisis de los resultados obtenidos.....	70
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		72
5.1.	Conclusiones	72
5.2.	Recomendaciones.....	73
REFERENCIAS		75
ANEXO: RESUMEN DE LA RECOMENDACIÓN ITU-T G.709/Y.1331		
OTN		78

ÍNDICE DE TABLAS

Tablas	Pág.
Tabla 1.1. Grilla de frecuencias centrales nominales de la banda C para DWDM con espaciamiento de 50 GHz, referidas a una frecuencia de 193,1 THz. Rec. ITU-T G.694.1.....	7
Tabla 1.2. Longitudes de ondas centrales nominales (nm) para CWDM con un espaciamiento de 20 nm. Rec. ITU-T G.694.2.....	8
Tabla 1.3. Coeficiente de atenuación en db/km de las fibras estandarizadas por la Unión Internacional de Telecomunicación, en función de la longitud de onda.....	17
Tabla 1.4. Coeficiente de Dispersión de Modo de Polarización máximos para cables de fibras (ITU-T G.652 a G.657).....	19
Tabla 3.1. Compensadores (pasivos) de Dispersión Cromática (Rec. ITU-T 671).....	42
Tabla 3.2. Valores de tolerancia a la dispersión cromática en ps/nm, para distintos esquemas de modulación a 10G y 40G.....	43
Tabla 3.3. Distancia máxima sin DCM en fibras G.652 y G.655.....	44
Tabla 3.4. Distancias máximas alcanzables por un enlace de 10G y 40G en función de la PMD de la fibra.....	45
Tabla 3.5. Penalización en db al OSNR en función del DGD'.....	46
Tabla 3.6. Valores de potencia nominal a la entrada un amplificador óptico que tiene una potencia máxima de salida de 20 dbm, en función del tipo de fibra, para un enlace de 40G....	48
Tabla A.1. Tasas de transmisión para OPU-k, ODU-k y OTU-k (k = 0, 1, 2, 3 y 4).....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras	Pág.
Figura 1.1 Diagrama en bloques de un sistema punto a punto WDM.....	9
Figura 1.2 Evolución de la Fibra Óptica.....	15
Figura 1.3. Coeficiente de dispersión cromática en las fibras ITU-T G.652, 653 y 655..	18
Figura 1.4 Evolución hacia los 100G de las Interfaces TDM / Ethernet.....	24
Figura 1.5. Secuencia de pulsos NRZ y ODB dispersados.....	26
Figura 1.6. Modulación QPSK.....	27
Figura 1.7. Modulación DP – QPSK 100G.....	29
Figura 1.8. Estructura y principio de funcionamiento de un Detector coherente.....	30
Figura 2.1. Red Nacional Integrada de Fibra Óptica del Estado.....	35
Figura 2.2. Arquitectura actual de la Red de Transmisión por Fibra Óptica.....	36
Figura 3.1 Esquema de un sistema punto a punto DWDM de 40λ que opera a 10G.....	40
Figura 3.2. Transporte de una señal de 40G en un sistema DWDM de 10G usando la técnica de Multiplexación Inversa.....	41
Figura 3.3. Sistema DWDM híbrido con canales de 10G y 40G.....	47
Figura 3.4. Definición de Estándares para el transporte de una señal de 100G.....	50
Figura 3.5. Rutas de encapsulación y mapeo para 100GbE – ITU-T SG 15 – G.709 OTN.	51
Figura 3.6. Sistema DWDM híbrido con canales de 10G y 100G.....	54
Figura 4.1. Esquema de la configuración utilizada en el laboratorio.....	56
Figura 4.2. Equipo DWDM Optix OSN 6800 – Huawei Technologies.....	57
Figura 4.3. Analizador de Espectro Óptico (OSA) AQ6370B – YOKOGAWA.....	58
Figura 4.4. Diagrama espectral de una señal de 10G con modulación NRZ.....	59
Figura 4.5. Diagrama espectral de una señal de 10G con modulación DRZ.....	60
Figura 4.6. Diagrama espectral de una señal de 40G con modulación DQPSK.....	61
Figura 4.7. Diagrama espectral a la salida del multiplexor DWDM compuesta de una señal de 10G con modulación NRZ entre dos señales de 40G con modulación DQPSK y un espaciamiento entre ellas de 100 GHz.....	62
Figura 4.8. Diagrama espectral a la salida del multiplexor DWDM compuesta de	

una señal de 10G con modulación NRZ al lado de dos señales de 40G con modulación DQPSK y un espaciamento entre ellas de 100 GHz.....	63
Figura 4.9. Diagrama espectral a la salida del multiplexor DWDM compuesta de una señal de 10G con modulación NRZ al lado (a 100 GHz) de dos señales de 40G con modulación DQPSK y un espaciamento de 200 GHz entre ellas.....	64
Figura 4.10. Diagrama espectral a la salida del multiplexor DWDM compuesta de una señal de 10G NRZ al lado de una señal de 40G DQPSK y una señal de 10G con modulación DRZ, todas con separación de 100GHz.....	65
Figura 4.11. Diagrama espectral a la salida el modulador DWDM compuesta de una señal de 10G NRZ al lado de una señal de 40G DQPSK con espaciamento de 100 GHz, y una señal de 10G DRZ con separación de 200GHz.....	66
Figura A.1. Estructura de capas OTN.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

ASE	Amplified Spontaneous Emission
BER	Bit Error Rate
CD	Chromatic Dispersion
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DCM	Dispersion Compensation Module
DGD	Differential Group Delay
DP-QPSK	Dual Polarization- Quadrature Phase Shift Keying
DPSK	Differential Phase-Shift Keying
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying
DRZ	Differential Return to Zero
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DSP	Digital Signal Processing
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
FEC	Forward Error Correction
FWM	Four Wave Mixing
HD-FEC	Hard-Decision Forward Error Correction
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISI	Inter-Symbol Interference
ITU	International Telecommunications Union
LO	Local Oscillator
MSAN	Multi-Service Access Node
MZM	Mach-Zehnder Modulator
NRZ	Non-Return to Zero
OADM	Optical Add-Drop Multiplexer
ODB	Optical Duo-Binary
OH	Over Head
OIF	Optical Internetworking Forum
OOK	On-Off Keying

OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
OTN	Optical Transport Network
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
PBS	Polarization Beam Splitter
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
PM	Polarization Multiplexing
PMD	Polarization Mode Dispersion
ROADM	Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer
ROSNR	Required Optical Signal to Noise Ratio
SBS	Stimulated Brillouin Scattering
SD-FEC	Soft-Decision Forward Error Correction
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SDM	Space Division Multiplexing
SPM	Self-Phase Modulation
SRS	Stimulated Raman Scattering
TDCM	Tunable Dispersion Compensation Module
TDM	Time Division Multiplexing
WDM	Wavelength Division Multiplexing
XPM	Cross-Phase Modulation

INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de esta sección se resumen de los antecedentes y la situación actual de los sistemas de transmisión por fibra óptica en Venezuela, así como la justificación, planteamiento del problema y objetivos del presente trabajo.

Antecedentes

Los primeros enlaces por fibra óptica se instalaron en Venezuela a inicios de los 80's como medio de interconexión local de las centrales telefónicas digitales, sustituyendo al cable multipar de cobre. Dichos enlaces operaban haciendo uso de la tecnología de multiplexación PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy) con una tasa de transmisión máxima de 140 Mbps, lo que equivale a 1920 canales de voz de 64 Kbps. El tipo de fibra óptica disponible en el mercado para ese entonces es la contenida en la Recomendación ITU-T G.652 denominada Fibra Monomodo Standard, cuya característica principal es su alto valor de dispersión cromática (17 ps/nm.km) en la ventana de menor atenuación (1.550 nm), factor limitante de la velocidad de transmisión [1].

Con la aparición de los sistemas SDH (Synchronous Digital Hierarchy) los cuales pueden alcanzar velocidades de 622,08 Mbps, 2.488,32 Gbps (2,5G) y 9.953,28 Gbps (10G), y la necesidad de cubrir mayores distancias sin el uso de regeneradores, surgió un nuevo tipo de fibra óptica DFS (Dispersion-Shifted Fiber), que mediante la modificación geométrica del perfil de índice de refracción, se puede conseguir desplazar la longitud de onda de dispersión nula a la tercera ventana [2]. De esta forma se comenzaron a instalar a principio de los 90's los primeros enlaces interurbanos con este tipo de fibra de dispersión desplazada.

La ampliación de la capacidad de transmisión, con el uso de múltiples enlaces SDH paralelos, fue agotando poco a poco el número de fibras disponibles en los cables, lo que dio

origen al uso de la tecnología WDM (Wavelength Division Multiplexing), la cual ya existía comercialmente desde hace algún tiempo en el mercado, pero no fue sino hasta finales de los 90's y principios de los años 2000, cuando se comienza a implantar en forma progresiva en las redes de transporte de las empresas operadoras de telecomunicaciones.

La fibra óptica de dispersión desplazada ITU-T G.653 [2], presenta desventajas al uso de la tecnología DWDM, al limitar el número canales por sistema, producto de los efectos no lineales, en especial el FWM (*Four-Wave Mixing*) que conduce a la aparición de longitudes de onda adicionales a las que inicialmente se introdujeron a la fibra, provocando diafonía entre ellas [3]. Para contrarrestar este fenómeno se fabricó la fibra *Non-Zero Dispersion-Shifted*, estandarizada bajo la norma ITU-T G.655 [9], que deja un valor significativo de dispersión cromática en la ventana de 1.550 nm, lográndose de esta manera construir enlaces DWDM de hasta 80 longitudes de onda por sistema. Es por ello que en Venezuela y quizás en las redes de transporte de la mayoría de los grandes operadores de telecomunicaciones del mundo, se encuentran instaladas los diferentes tipos de fibra: ITU-T G.652, G.653 y G.655.

Planteamiento y Justificación del Problema

Con el desarrollo de las interfaces de 40G y 100G en los dispositivos *switches* y *routers*, los operadores de telecomunicaciones se ven en la necesidad de adecuar sus redes de transporte a estos nuevos requerimientos. A estas altas tasas de transmisión, los sistemas DWDM son menos tolerantes a la dispersión cromática de la fibra y a los efectos no lineales. Adicionalmente hay que tomar en cuenta otro fenómeno importante dentro la fibra que produce sus efectos cuando se tienen canales con portadoras por encima de los 10G, la Dispersión de Polarización de Modo (PMD, *Polarization Mode Dispersion*), el cual ocasiona una penalización adicional en la Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR) del sistema. Los métodos de compensación utilizados en los enlaces no son suficientes, por lo que los fabricantes de equipos han tenido que recurrir a otras técnicas de modulación que presenten mayor tolerancia a estos fenómenos dentro de la fibra.

El propósito de este trabajo ha sido elaborar una propuesta de estudio sobre la factibilidad de migración de los sistemas DWDM que operan actualmente en Venezuela con longitudes de onda de 2.5G y 10G a sistemas de 40G y 100G, en redes híbridas con fibras

ópticas ITU-T G.652, G.653 y G.655; el cual sirva de guía para los operadores de telecomunicaciones, con el fin de responder a las necesidades de incremento de ancho de banda en sus redes de transporte, haciendo un uso más eficiente de sus recursos físicos instalados, con el menor impacto posible en su red actual y sin afectar la calidad de los servicios que se prestan a través de ellas.

Para ello se han revisado algunas de las especificaciones técnicas de organismos normativos de estándares como la *International Telecommunications Union* (ITU) [1], el *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) [25] y el *Optical Internetworking Forum* (OIF) [19], así como distintos libros, publicaciones, *White paper*, información técnica de fabricantes de equipos, etc. que hablan sobre estado del arte de la tecnología, su desarrollo, implementaciones y pruebas de campo en distintas administraciones a nivel mundial, que sirven de referencia para ser aplicadas en nuestro país. Adicionalmente se realizaron algunas pruebas de laboratorio sobre equipos DWDM con interfaces de 10G y 40G, con el fin de determinar el mínimo espaciamiento entre estas señales cuando se combinan en un mismo sistema DWDM. El análisis sobre las interfaces de 100G se realizó sobre bases teóricas, por tratarse de una tecnología muy reciente y no contar con las unidades disponibles.

Objetivo General del estudio.

Estudiar la factibilidad para la migración de los sistemas DWDM que actualmente operan a 2.5 y 10 Gbps a sistemas de 40 y 100 Gbps, considerando las limitaciones de transmisión sobre fibras ITU-T G.652, ITU-G.653 e ITU-T G.655.

Objetivos Específicos.

- a) Analizar los problemas actuales que limitan la transmisión a velocidades por encima de los 10 Gbps. en los distintos tipos de fibra ITU-G.652, G.653 y G.655.
- b) Describir las distintas tecnologías de evolución existentes en el mercado que aumentan la tolerancia a los fenómenos de restricción dentro de la fibra óptica, para poder transmitir a tasas de 40 y 100 Gbps.

- c) Realizar un análisis de los posibles escenarios para alcanzar el mayor número de canales en un sistema DWDM con tasas de 40 y 100 Gbps, en redes con distintos tipos de fibra ITU-G.652, G.653 y G.655.
- d) Elaborar una propuesta para facilitar la migración de los sistemas DWDM actuales para que operen a velocidades por encima de 10 Gbps.
- e) Validar la propuesta

Para alcanzar estos objetivos, el documento se ha desarrollado en cinco capítulos estructurados de la siguiente manera: En el capítulo I se presentan los fundamentos teóricos en los cuales se basó el desarrollo de este trabajo. Luego, en el capítulo II se da una breve descripción de la situación actual de los sistemas de transmisión por fibra óptica desplegados por las principales operadoras de telecomunicaciones del país. El capítulo III describe la metodología utilizada y se analizan algunos de los posibles escenarios de migración a sistemas de 40G y 100G. En el capítulo IV se presenta un análisis de los resultados obtenidos en pruebas de laboratorio, y finalmente se cierra con el capítulo V que contiene las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos, en los cuales se basó el desarrollo de este trabajo, tales como los asociados a las características y componentes de un sistema DWDM, características de los distintos tipos de fibra óptica, los fenómenos que afectan la propagación de la Luz en la fibra, esquemas de modulación utilizados en los sistemas DWDM, evolución hacia los sistemas de 40G y 100G y las técnicas para contrarrestar los factores de restricción a 40G y 100G

1.1 Características de un Sistema DWDM

La Fibra óptica es el medio de transmisión más utilizado por las empresas de telecomunicaciones para el transporte de señales de banda ancha, debido a su capacidad de transmitir a muy altas velocidades, que alcanzan hoy en día el orden de los Terabits por segundo. Para ello se hace uso de distintas tecnologías de multiplexación como son SDM (*Space Division Multiplexing*), TDM (*Time Division Multiplexing*) y WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). Esta última es la que aprovecha mejor las capacidades de transmisión de la fibra, ya que permite llevar varias portadoras simultáneas a diferentes longitudes de onda, las cuales son capaces de transportar centenares de bits por segundo de forma independiente.

Un sistema WDM, como ya se ha mencionado, es capaz de transmitir varias señales en forma simultánea a través de una sola fibra, utilizando para ello distintas longitudes de ondas (frecuencias) como señal portadora. A diferencia de los sistemas TDM, las señales digitales son transportadas de forma asíncrona por cada frecuencia, por lo que pueden ser de distinta tasa de transmisión e incluso de protocolos diferentes; de esta forma, se puede elegir la tasa de

transmisión más alta de un sistema TDM de acuerdo al tipo de fibra y así elegir el número de canales ópticos WDM hasta alcanzar la capacidad necesaria.

A diferencia de la multiplexación por división de frecuencia (FDM) en los sistemas analógicos, los sistemas de comunicación por fibra óptica utilizan longitudes de onda ópticas como señal portadora, dividiendo la ventana de más baja atenuación en varios canales dentro de una sola fibra. A este método de multiplexación se le denomina Multiplexación Densa de Longitud de Onda (por sus siglas en inglés DWDM) ya que la separación entre canales es muy pequeña [3].

Esta separación está normada bajo la recomendación ITU-T G.694.1 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones [4], la cual define las frecuencias (en THz) permitidas para DWDM en las bandas C (1529,16 nm – 1560,61 nm) y L (1570,42 nm – 1603,57 nm) de la siguiente manera [4]:

Para espaciamientos de canales de 12,5 GHz

$193,1 + n \times 0,0125$, donde n es un entero positivo o negativo incluido el 0

Para espaciamientos de canales de 25 GHz

$193,1 + n \times 0,025$, donde n es un entero positivo o negativo incluido el 0

Para espaciamientos de canales de 50 GHz

$193,1 + n \times 0,05$, donde n es un entero positivo o negativo incluido el 0

Para espaciamientos de canales de 100 GHz

$193,1 + n \times 0,1$, donde n es un entero positivo o negativo incluido el 0

En la tabla 1.1 se indican las frecuencias centrales nominales en la banda C basadas en el espaciamiento de canal mínimo de 50 GHz, referidas a una frecuencia de 193,1 THz [4].

Tabla 1.1 Grilla de frecuencias centrales nominales de la banda C para DWDM con espaciamiento de 50 GHz, referidas a una frecuencia de 193,1 THz. Rec. ITU-T G.694.1

N°	Frecuencia central (THz)	Longitud de onda (nm)	N°	Frecuencia central (THz)	Longitud de onda (nm)	N°	Frecuencia central (THz)	Longitud de onda (nm)	N°	Frecuencia central (THz)	Longitud de onda (nm)
1	196.05	1529.16	21	195.05	1537.00	41	194.05	1544.92	61	193.05	1552.93
2	196.00	1529.55	22	195.00	1537.40	42	194.00	1545.32	62	193.00	1553.33
3	195.95	1529.94	23	194.95	1537.79	43	193.95	1545.72	63	192.95	1553.73
4	195.90	1530.33	24	194.90	1538.19	44	193.90	1546.12	64	192.90	1554.13
5	195.85	1530.72	25	194.85	1538.58	45	193.85	1546.52	65	192.85	1554.54
6	195.80	1531.12	26	194.80	1538.98	46	193.80	1546.92	66	192.80	1554.94
7	195.75	1531.51	27	194.75	1539.37	47	193.75	1547.32	67	192.75	1555.34
8	195.70	1531.90	28	194.70	1539.77	48	193.70	1547.72	68	192.70	1555.75
9	195.65	1532.29	29	194.65	1540.16	49	193.65	1548.11	69	192.65	1556.15
10	195.60	1532.68	30	194.60	1540.56	50	193.60	1548.51	70	192.60	1556.55
11	195.55	1533.07	31	194.55	1540.95	51	193.55	1548.91	71	192.55	1556.96
12	195.50	1533.47	32	194.50	1541.35	52	193.50	1549.32	72	192.50	1557.36
13	195.45	1533.86	33	194.45	1541.75	53	193.45	1549.72	73	192.45	1557.77
14	195.40	1534.25	34	194.40	1542.14	54	193.40	1550.12	74	192.40	1558.17
15	195.35	1534.64	35	194.35	1542.54	55	193.35	1550.52	75	192.35	1558.58
16	195.30	1535.04	36	194.30	1542.94	56	193.30	1550.92	76	192.30	1558.98
17	195.25	1535.43	37	194.25	1543.33	57	193.25	1551.32	77	192.25	1559.39
18	195.20	1535.82	38	194.20	1543.73	58	193.20	1551.72	78	192.20	1559.79
19	195.15	1536.22	39	194.15	1544.13	59	193.15	1552.12	79	192.15	1560.20
20	195.10	1536.61	40	194.10	1544.53	60	193.10	1552.52	80	192.10	1560.61

El valor de la velocidad de la luz en el vacío “ c ” (utilizado para las conversiones entre frecuencia y longitud de onda: $f = \frac{c}{\lambda}$) es igual a $2,99792458 \times 10^8$ m/s. [4]

Si bien DWDM es la tecnología de fibra óptica que hoy día puede garantizar el manejo de grandes volúmenes de tráfico, sus costos son elevados, por lo que en aquellos casos donde no se requiera tal capacidad, CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*) emerge como una solución técnico-económica factible.

CWDM se caracteriza por un espacio más ancho entre canales que en la tecnología DWDM, tal como se define en la Rec. UIT-T G.671. [26] Los sistemas CWDM permiten aplicaciones rentables desde el punto de vista técnico-económico, gracias a una combinación

de fuentes láser sin dispositivos de refrigeración, una tolerancia de selección de longitudes de onda láser menos exigentes, y filtros pasabanda más amplios.

CWDM funciona de la banda 1270 nm a 1610nm, la separación entre canales es de 20 nm, y puede multiplexar hasta 16 longitudes de onda (desde la λ_3 hasta la λ_{18}). Estas se encuentran normadas bajo la recomendación ITU-T G.694.2 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones [5] (Ver tabla 1.2).

Tabla 1.2. Longitudes de ondas centrales nominales (nm) para CWDM con un espaciamiento de 20 nm. Rec. ITU-T G.694.2

$\lambda(N^\circ)$	Longitud de onda (nm)	$\lambda(N^\circ)$	Longitud de onda (nm)
3	1311	11	1471
4	1331	12	1491
5	1351	13	1511
6	1371	14	1531
7	1391	15	1551
8	1411	16	1571
9	1431	17	1591
10	1451	18	1611

Se debe utilizar un valor "c" (velocidad de la luz en el vacío) para la conversión entre longitud de onda y frecuencia ($f = \frac{c}{\lambda}$) igual a $2,99792458 \times 10^8$ m/s. [5]

Mientras que los sistemas DWDM son ampliamente utilizados en redes de transporte de larga distancia, los sistemas CWDM son usados en las redes de transporte metropolitanas y como plataforma integrada para una diversidad de clientes, servicios y protocolos [5].

1.2 Componentes de un sistema DWDM

La estructura general de un sistema WDM está compuesta por los siguientes elementos:

Unidad Transpondedor Óptico (OTU)

Multiplexor (MUX)

Demultiplexor (DEMUX)

Amplificador Óptico Booster (BA)

Amplificador Óptico de Línea (OLA)

Pre-amplificador Óptico (PA)

En la figura 1.1 se muestra el diagrama en bloques y flujo de señal de un sistema punto a punto WDM.

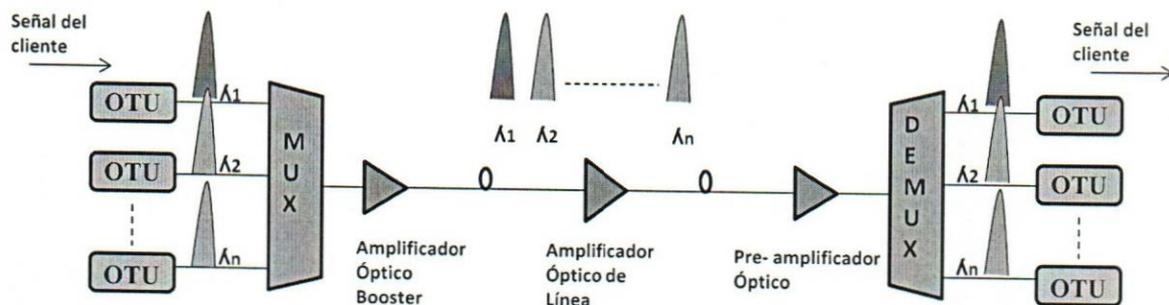


Figura 1.1 Diagrama en bloques de un sistema punto a punto WDM

La Unidad Transpondedor Óptica (OTU) es la encargada de convertir la señal óptica estándar del cliente en una señal óptica con longitud de onda específica de acuerdo a la recomendación ITU-T G.694.1 del lado WDM.

En el extremo transmisor, la OTU recibe la señal óptica del equipo del cliente a través del fotodetector, el cual realiza la conversión óptica-eléctrica. Los pulsos de tensión y corriente generados por el fotodetector pasan por un proceso conocido como 3R (*Reshape - Retime - Regeneration*), mediante el cual se reconstruye la señal, se recupera el sincronismo y se produce la detección y corrección de errores. Luego, del lado WDM, la señal es convertida

nuevamente en óptica, modulando un diodo láser sintonizado a una frecuencia y ancho espectral especificados dentro de la grilla de la recomendación ITU-T G.694.1, para ser enviada a la unidad multiplexora.

En el extremo receptor de la OTU, la señal óptica con longitud de onda específica ITU-T G.694.1, es recibida por el fotodetector de la unidad demultiplexora y convertida en eléctrica. Pasa por el proceso 3R y luego es convertida nuevamente en óptica con una longitud de onda estándar, para ser entregada al equipo del cliente.

El Multiplexor es una unidad pasiva de N- entradas y una sola salida. Cada una de las entradas tiene un filtro sintonizado a una frecuencia específica de la grilla ITU-T G.694.1, las cuales son combinadas en un haz de luz de señal compuesta a la salida. El Demultiplexor trabaja exactamente bajo el proceso inverso; posee una sola entrada y N-salidas, cada una con un filtro sintonizado a una longitud de onda específica [4].

Existen diferentes tecnologías de filtraje utilizadas en multiplexores y demultiplexores: el filtro multicapa de película delgada; el filtro Mach-Zehnder, también conocido como interferómetro de doble haz; el filtro AWG (*Arrayed Waveguide Grating*), entre otros. La selección de cada uno de ellos dependerá de diversos factores como son: las pérdidas de inserción, la diafonía entre los canales, la estabilidad con la temperatura, la baja dependencia con la polarización y el costo [6].

Los multiplexores y demultiplexores pueden ser configurados, según sea su ubicación en la red, en Modo Terminal o como multiplexores de inserción / extracción ópticos (OADM por sus siglas en inglés), estos últimos proporcionan una solución eficiente para gestionar el tráfico en tránsito en redes metropolitanas y de larga distancia. Pueden implementarse empleando diversos componentes (Redes de Difracción Bragg, AWGs, filtros multicapa, etc.), teniendo en cuenta el número de longitudes de onda que puede soportar, facilidad de inserción y extracción de longitudes de onda, modularidad y la complejidad en el diseño físico de transmisión [6].

Los sistemas NG-DWDM (*Next Generation - Dense Wavelength Division Multiplexing*) utilizan multiplexores de inserción y extracción reconfigurables (ROADM). Para un demultiplexor OADM fijo existe una relación directa entre el puerto de salida y la

longitud de onda; a cada longitud de onda se le asigna una fibra de salida específica (o puerto). En un ROADM cualquier longitud de onda o un grupo de longitudes de onda, pueden ser dirigidas a cualquier puerto de salida y las mismas pueden ser cambiadas o reasignadas a diferentes fibras de forma dinámica a través una interfaz WSS (*Wavelength Selective Switches*). Esto permite contar con una mayor capacidad de administración y gestión centralizada de la red en forma dinámica.

El Amplificador Óptico (OA) es el encargado de compensar las pérdidas de potencia de la señal óptica ocasionada por la atenuación de la fibra, los conectores, empalmes y las pérdidas de inserción de los componentes pasivos como los multiplexores, demultiplexores, divisores, acopladores, etc.

En la actualidad, hay dos tipos principales de amplificador óptico en uso: el Amplificador Óptico Semiconductor (SOA), que es en realidad un diodo láser, sin o con poca retroalimentación óptica, y el Amplificador Óptico de Fibra (FOA), en el cual el medio activo (o medio de ganancia) es un segmento de fibra óptica especial que está conectado a un láser de bombeo, provocando que la señal óptica sea amplificada cuando pasa a través de este segmento de fibra. Dentro de esta categoría se encuentra los Amplificadores ópticos de Fibra Dopada con Erblio (EDFA) que funcionan bajo el principio de emisión estimulada, y el amplificador Raman que opera bajo el principio del efecto no-lineal de la fibra, SRS (*Stimulated Raman Scattering*).

Los amplificadores EDFA son los más utilizados en los sistemas DWDM de larga distancia debido a su alta ganancia, gran ancho de banda, independencia de la polarización y la característica de amplificación independiente de la tasa de transmisión; sin embargo, el uso de muchos amplificadores de este tipo en un mismo enlace desmejora la relación señal a ruido óptica (OSNR), debido al componente de ruido adicional ocasionado por el efecto de emisión espontánea amplificada (ASE).

De acuerdo con su ubicación en la red DWDM, un EDFA puede ser un *booster amplifier* (BA) colocado en lado de transmisión a la salida del multiplexor, un amplificador de línea (OLA) en un punto intermedio del enlace, o un preamplificador (PA), antes de la unidad demultiplexora en el extremo receptor.

1.3 Tipos de Fibra

De acuerdo a las recomendaciones la ITU-T, actualmente se tienen normado siete diferente tipos de fibra: G.651, G.652, G.653, G.654, G.655, G.656 y G.657.

La G.651 corresponde al tipo de fibra multimodo de índice gradual, la cual en sus inicios fue considerada como la única solución práctica para distancias alrededor de 10 km, que no superaban los 40 Mbps, pero que rápidamente fueron sustituidas de las redes públicas conmutadas, debido al desarrollo del Laser y a la aparición en el mercado de las fibras monomodo. Hoy día este tipo de fibra continúa siendo ampliamente utilizada en aplicaciones de cableado de redes Ethernet con longitudes que van desde 300 a 2.000 m, dependiendo de la tasa de transmisión [7].

La G.652 es la fibra monomodo estándar; se optimizó inicialmente para su uso en la ventana de 1310 nm, donde presenta una dispersión cromática cercana a cero (con una pendiente máxima de $0.092 \text{ ps} / \text{nm}^2 \times \text{km}$ entre 1300 – 1324 nm) y un coeficiente de atenuación de 0,5 db/km, pero también puede ser utilizada en tercera ventana donde la atenuación es menor (0,4 db/km.), pero requiere del uso de dispositivos compensadores de dispersión, ya que ésta alcanza valores de $17 \text{ ps} / \text{nm} \times \text{km}$ a 1.550 nm [1].

Esta recomendación tiene cuatro variantes: UIT-T G.652 A, ITU-T G.652 B, ITU-T G.652 C e ITU-T G.652 D [1] Las fibras G.652. A y B presentan un pico de atenuación (*Water-peak*) por la presencia de iones OH^- en torno a la longitud de onda de 1383 nm. La principal ventaja de la G.652 C y D, es su mayor capacidad de transmisión por el aumento del ancho de banda al aprovechar la región donde se encontraba el *Water-peak*. Las versiones G.652 B y D tienen la capacidad de alcanzar distancias superiores a altas velocidades sin regeneración debido a su baja dispersión por modo de polarización $0.20 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$.

La fibra monomodo G.653 fue creada con el fin de ser utilizada en enlaces de larga distancia a grandes tasas de transmisión. Para ello, mediante un diseño especial de la sección transversal y una disminución del diámetro del campo modal (7.8 - 8.5 μm), se logra desplazar el punto de cero dispersión cromática a 1550 nm para que coincida con la ventana de la atenuación mínima [2].

En la práctica al tener dispersión cero a la longitud de onda de emisión, se incrementa efecto no lineal denominado mezclado de cuatro ondas (FWM), el cual dificulta la Multiplexación por División de Longitud de onda Densa (DWDM).

La G.654, es una fibra estándar especial monomodo que ha sido optimizada para operar en la región de 1500 nm a 1600 nm. Presenta una baja atenuación en la tercera ventana de transmisión (0.275 dB/km en 1550 nm), la cual se logra mediante el uso de un núcleo de sílice puro, incrementando así sus costos de fabricación. Puede soportar mayores niveles de potencia debido al incremento del diámetro de campo modal (9.5 a 10.5 μm); sin embargo su coeficiente de dispersión cromática a 1550 nm es alto (20 a 22 ps / nm x km). Esta fibra ha sido diseñada para usarse en enlaces de cables submarinos de larga distancia [8].

La G.655, denominada fibra de dispersión desplazada no nula (NZDSF), es una fibra monomodo con un coeficiente de dispersión cromática un poco mayor que cero, en longitudes de onda en el rango de 1530 a 1565 nm. (1 a 10 ps / nm x km). Esta dispersión reduce los efectos no lineales los cuales son especialmente perjudiciales en los sistemas de multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM). A longitudes de onda más bajas, el coeficiente de dispersión puede cruzar por cero, pero los valores del coeficiente de dispersión cromática en estas longitudes de onda pueden ser especificados para ser utilizados en sistemas multiplexación por división de longitud de onda gruesa (CWDM) que no tienen impedimentos significativos debido a los efectos no lineales [9].

La G.656 es una fibra monomodo con dispersión cromática mayor a cero (1 a 14 ps / nm x km) en todo el rango de longitud de onda de 1460 a 1625 nm. Esta dispersión permite reducir los efectos no lineales, tales como, la mezcla de cuatro ondas (FWM) y la modulación de fase cruzada (XPM) en un rango de longitud de onda más amplia, pudiéndose utilizar en sistemas CWDM y DWDM [10].

La G.657 es una fibra diseñada para redes de acceso, incluyendo el interior de edificios, y son capaces de operar en todo el rango de 1260 a 1625 nm. Introduce dos categorías de fibras monomodo G.657 A y B; la categoría A es totalmente compatible con las fibras monomodo UIT-T G.652 D en términos de atenuación, coeficiente de dispersión cromática y especificaciones del PMD, con de radio de macrocurvatura de hasta 7.5 mm con

0.5 db de atenuación. La categoría B, no es necesariamente compatible con ITU-T G.652 D, pero es capaz de tener muy bajos valores de pérdidas de macrocurvatura (5 mm con 0.15 db), siendo la fibra más adecuada para espacios estrechos [11].

En la figura 1.2 se puede apreciar en forma esquematizada, como ha sido la evolución tecnológica de la fibra óptica, así como el desarrollo de las especificaciones establecidas en las distintas recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, en función de los requerimientos de transmisión para cada una de las aplicaciones [14].

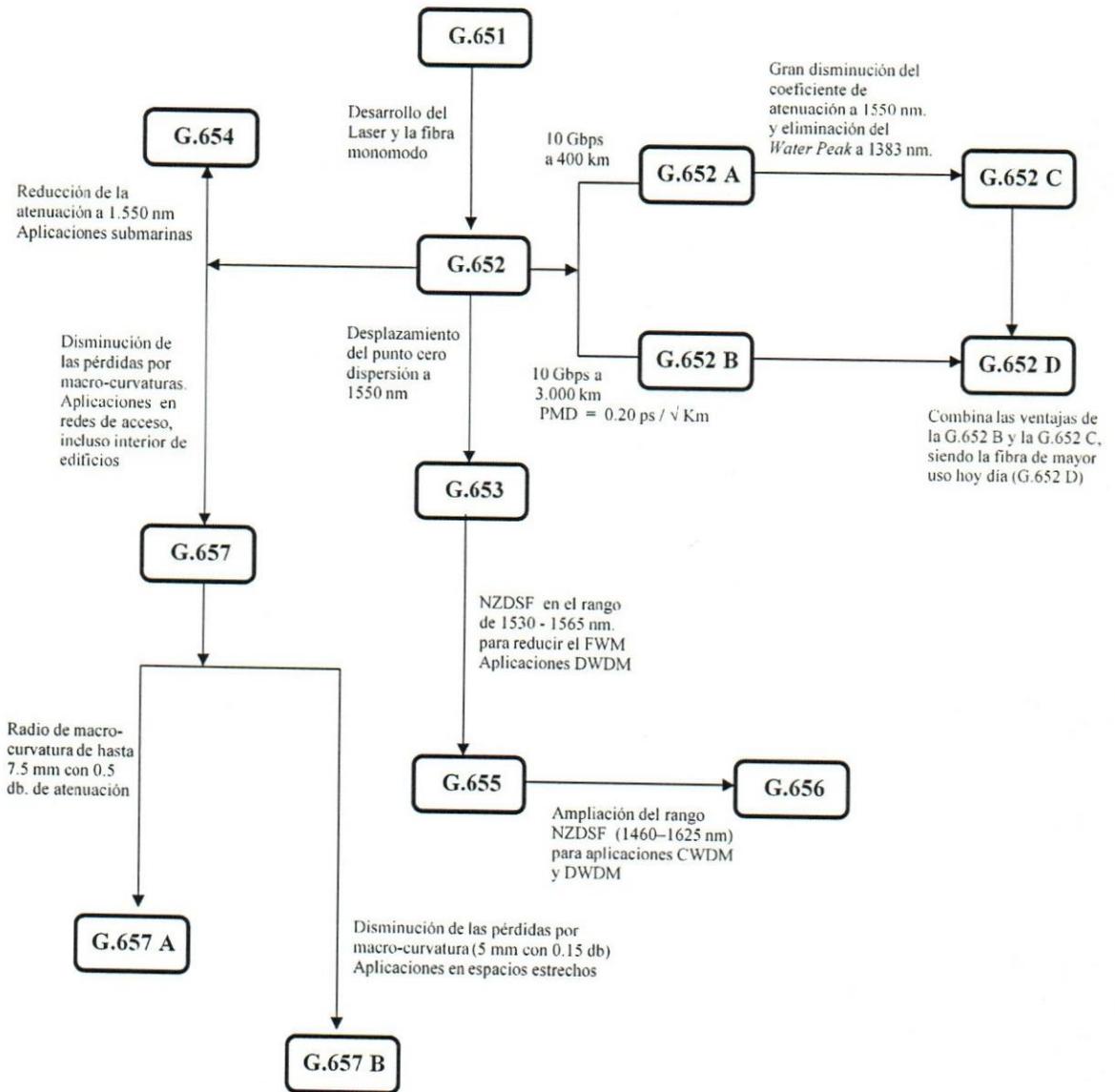


Figura 1.2 Evolución de la Fibra Óptica [14]

1.4 Fenómenos que afectan la propagación de la Luz en la fibra

La luz se propaga en el vacío a una velocidad aproximada de 3×10^8 m/s. En un medio distinto al vacío esta velocidad disminuye en razón al índice de refracción del medio. En la fibra además del índice de refracción, existen otros fenómenos físicos que afectan la

propagación de la luz dentro de la fibra, los cuales dependen principalmente del material y algunos de ellos se originan durante el proceso de fabricación; entre ellos se destacan la Atenuación, la Dispersión Cromática, la Dispersión de Modo de Polarización y los Efectos no Lineales, como se describen a continuación.

1.4.1 Atenuación

La atenuación en la fibra óptica está determinada principalmente por tres tipos de pérdida: las pérdidas por absorción, las pérdidas por difusión (esparcimiento) y las pérdidas por curvatura. Las pérdidas por curvatura, denominadas pérdidas extrínsecas, son ocasionadas por estrés durante el tendido y fabricación del cable, por lo que no tienen un gran efecto sobre el coeficiente de atenuación en la fibra.

Las pérdidas por absorción son causadas por el material de fibra, donde las impurezas y el exceso de iones OH^- producidos por los residuos de agua dejados durante el proceso de fabricación, absorben la luz convirtiéndola en calor.

Las pérdidas por esparcimiento se manifiestan como reflexiones del material, debido a las irregularidades sub-microscópicas ocasionadas durante el proceso de fabricación; cuando un rayo de luz choca contra estas impurezas se dispersa y se refleja. La más común es la difusión (*scattering*) de Rayleigh, que es causada por pequeñas variaciones en la densidad del vidrio, tales como diferentes concentraciones de dióxido de silicio (SiO_2), dióxido de germanio (GeO_2) y pentóxido de fósforo (P_2O_5). Su efecto es mayor en longitudes de onda bajas (alrededor de los 800nm).

En la Tabla 1.3. se muestra el coeficiente de atenuación en db/km de las fibras estandarizadas por la Unión Internacional de Telecomunicación, en función de la longitud de onda [1], [2], [8], [9], [10] y [11].

Tabla 1.3. Coeficiente de atenuación en db/km de las fibras estandarizadas por la Unión Internacional de Telecomunicación, en función de la longitud de onda

G. 651	
Longitud de onda (nm)	Coefficiente de atenuación (db/km)
830	4
1300	2

G.652 A		G.652 B		G.652 C y D	
Longitud de onda (nm)	Coefficiente de atenuación (db/km)	Longitud de onda (nm)	Coefficiente de atenuación (db/km)	Longitud de onda (nm)	Coefficiente de atenuación (db/km)
1310	0,5	1310	0,4	1310 - 1625	0,4
1550	0,4	1550	0,35	1383	0,4
		1625	0,4	1550	0,3

G. 653		G. 654	
Longitud de onda (nm)	Coefficiente de atenuación (db/km)	Longitud de onda (nm)	Coefficiente de atenuación (db/km)
1550	0,35	1550	0,22

G. 655		G.656	
Longitud de onda (nm)	Coefficiente de atenuación (db/km)	Longitud de onda (nm)	Coefficiente de atenuación (db/km)
1550	0,35	1460	0,4
1625	0,4	1550	0,35
		1625	0,4

G. 657 A y B	
Longitud de onda (nm)	Coefficiente de atenuación (db/km)
1310 - 1625	0,4
1383	0,4
1550	0,3

1.4.2 Dispersión cromática

La dispersión cromática se puede definir como el ensanchamiento que sufre un pulso a medida que se propaga a través de la fibra, debido a que las distintas componentes (longitudes de onda) de la señal óptica viajan a distintas velocidades, llegando al receptor en diferentes instantes de tiempo. Este ensanchamiento viene expresado en $ps/nm.km$ y aumenta en

proporción directa con la longitud del enlace y el ancho espectral de la fuente (Laser); esto ocasiona la interferencia inter-símbolo (ISI), la cual limita la tasa de transmisión.

En la fibra UIT-T G.652 existe un rango de longitud de onda de dispersión nula de 1300 a 1324 nm y una pendiente máxima de dispersión de $0.093 \text{ ps/nm}^2 \text{ km}$. En la gama de longitud de onda de 1525 a 1575 nm, el coeficiente de dispersión es de aproximadamente 20 ps/nm.km .

En el caso de la fibra UIT-T G.653 el punto de cero dispersión se desplaza ventana de 1550 nm y con una pendiente de $0.085 \text{ ps/nm}^2 \text{ km}$ en el rango de longitud de onda de 1525 a 1575 nm, donde el coeficiente de dispersión máxima es 3.5 ps/nm.km .

El valor absoluto del coeficiente de dispersión de la fibra ITU-T G.655 está alrededor de $5,0 \text{ ps / nm.km}$ en el rango de 1530 a 1565 nm.

En la figura 1.3 se muestra las características de los coeficientes de dispersión cromática para estos tres tipos de fibra estandarizados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones [14]. Se observa que en la fibra G.652 el punto de cero dispersión cromática está ubicado cerca de la ventana de 1.310 nm, la cual no es precisamente la de menor atenuación. En la fibra G.653 este punto de cero dispersión se ha desplazado a la ventana de 1.550 nm, a través de una reducción del diámetro del campo modal en el proceso de fabricación. Si bien es cierto que con esta modificación se logra alcanzar mayores distancias a velocidades de transmisión superiores que con la fibra G.652, también se incrementan los efectos no lineales, que limitan la cantidad de canales en los sistemas DWDM. Es por ello que surge la fibra G.655 cuya característica principal es que presenta un valor de dispersión no nula (aprox. $4,5 \text{ ps/nm.km}$) en la ventana de 1.550 nm, minimizando de esta manera los efectos no lineales.

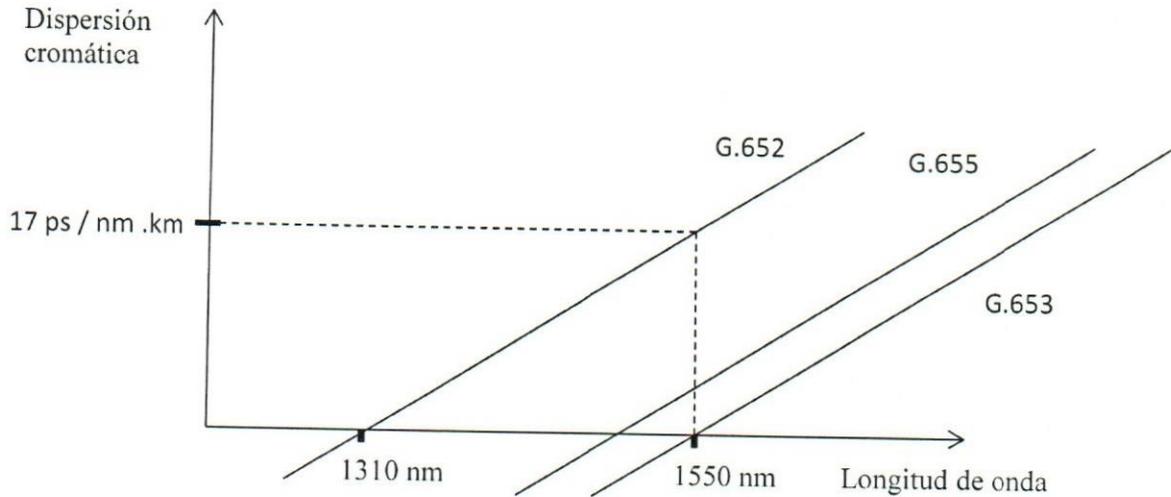


Figura 1.3. Coeficiente de dispersión cromática en las fibras ITU-T G.652, 653 y 655

1.4.3 Dispersión de Modo de Polarización

La Dispersión de Modo de Polarización (PMD) es causada por una pequeña asimetría en la fibra. Cuando una fibra es perfectamente circular la constante de propagación entre la polarización vertical y horizontal de la luz es la misma y por tanto también lo es la velocidad de propagación de cada polarización; pero cuando existe cierta asimetría, la velocidad de propagación de cada polarización es distinta por lo que llegan en instantes de tiempo diferentes al final de la fibra, produciéndose un ensanchamiento del pulso. Esta diferencia de retardo entre los modos de polarización se denomina retardo diferencial de grupo (DGD: *Differential Group Delay*). Este parámetro se utiliza para determinar el PMD y viene dado por:

$$DGD = D_{PMD} * (Longitud)^{1/2}$$

El PMD es de naturaleza estadística y varía durante el ciclo de vida de una fibra. Esta variación puede deberse a un excesivo estrés aplicado durante el transporte y el cableado, efectos causados por la temperatura, o daños físicos producidos durante la instalación. Sin embargo sus efectos comienzan a notarse a partir de los 10G. En la tabla 1.4 se encuentran los valores estandarizados de Dispersión de Modo de Polarización (PMD_Q) por la Unión

Internacional de Telecomunicaciones para los cables de fibra G.652 a G.657 [1], [2], [8], [9], [10] y [11].

Tabla 1.4. Coeficiente de Dispersión de Modo de Polarización máximos para cables de fibras (ITU-T G.652 a G.657)

Fibra ITU-T	Categoría	Coeficiente PMD _Q ps / \sqrt{km}
G.652	A y C	$\leq 0,5$
	B y D	$\leq 0,2$
G.653	A	$\leq 0,5$
	B	$\leq 0,2$
G.654	A	$\leq 0,5$
	B y C	$\leq 0,2$
G.655	A y B	$\leq 0,5$
	C, D y E	$\leq 0,2$
G.656	-	$\leq 0,2$
G.657	A	$\leq 0,2$
	B	(no esencial)*

*Redes de acceso con pequeños radios de curvatura

El PMD_Q representa el valor de diseño de un enlace concatenado de M segmentos de 20 km de fibras individuales (enlace de referencia de 400 km) basados en un nivel estadístico de Q%. (Normalmente M=20 y Q=0,01).

1.4.4 Efectos no-lineales

Con el incremento de la tasa de transmisión a partir de 10 Gbps y la longitud de los enlaces, se hace necesario aumentar la potencia de los transmisores y el uso de amplificadores ópticos. A raíz de esto, los efectos no lineales en la fibra comienzan a ser importantes porque alteran significativamente las características de las señales transmitidas, con la degradación de la calidad del sistema y la limitación de la capacidad.

Esta no linealidad, aunque incide de diferentes formas sobre la transmisión, se basa en la interacción de la radiación transmitida con el material por donde se propaga la radiación y

responde a dos mecanismos básicos: El primero es la interacción de los fotones incidentes con algunos modos de vibración del material que se conocen como Fonones; de esta interacción resultan dos tipos de dispersiones: la Dispersión Estimulada de Raman (*Stimulated Raman Scattering* SRS) y la Dispersión Estimulada de Brillouin. (*Stimulated Brillouin Scattering* SBS).

El segundo es un efecto no-lineal conocido como “Efecto Kerr”, provocado por la variación del índice de refracción de la fibra con la intensidad del campo eléctrico aplicado. Cuando la intensidad de la radiación óptica sobrepasa una determinada potencia, se producen diferentes fenómenos como la auto modulación de fase (*Self-Phase Modulation* SPM), que ocasiona una variación en la modulación de la fase de la señal a partir de su propia potencia; la modulación de fase cruzada (*Cross-Phase Modulation* XPM), en el cual la variación no-lineal de la fase no sólo depende de la potencia óptica del propio canal, sino también de los canales adyacentes; y la mezcla de cuatro ondas (*Four Wave Mixing* FWM). En este último, diferentes canales ópticos interactúan entre sí, dando lugar a la creación de nuevas componentes espectrales. La generación de estas nuevas frecuencias afecta el desempeño de los sistemas WDM, debido a la interferencia con otros canales, aumentando de esta manera la diafonía entre ellos.

1.5 Esquemas de modulación utilizados en los sistemas DWDM actuales

En la sección 1.4 se hizo mención a los distintos fenómenos que afectan la propagación de la luz dentro de la fibra óptica. En los sistemas DWDM que operan a velocidades inferiores a 10G, los factores de restricción ocasionados por la atenuación y la dispersión cromática son subsanados con el uso de amplificadores ópticos y módulos compensadores de dispersión respectivamente. En lo que respecta al PMD, sus efectos comienzan a evidenciarse a partir de los 10G. Adicionalmente las tasas de transmisión óptica también se ven limitadas por la velocidad disponible de los componentes opto electrónicos. En este sentido resulta de suma importancia considerar los aspectos prácticos en el diseño de esquemas de modulación óptica (técnicas y formatos de modulación), los cuales se detallan a continuación.

1.5.1 Técnicas de modulación

En la actualidad se usan tres tecnologías básicas de modulación: la modulación directa, los moduladores por electro absorción y los moduladores Mach-Zehnder (MZMs). En la modulación directa la potencia de salida es proporcional a la corriente de modulación; se basa en una estructura simple, de baja pérdida y de bajo costo. Sin embargo, los cambios de la corriente de modulación se traducirán en cambios de la longitud de la cavidad resonante de láser, lo que provocará una variación lineal de la longitud de onda de la señal emitida. Esta variación, llamada modulación chirrido (*chirp*), es en realidad un tipo de jitter que amplía el ancho del espectro de emisión del láser, lo cual limita la velocidad de transmisión y la distancia del sistema. En general, para una fibra óptica convencional G.652, la distancia de transmisión es menor o igual a 100 kilómetros cuando se transmite a una velocidad menor o igual a 2,5 Gbps. [14].

En el modulador de electro-absorción no se modula el láser directamente, sino que se añade una especie de compuerta externa en la ruta de salida del láser para modular la señal óptica. De hecho, este modulador funciona como un interruptor accionado por la señal eléctrica modulante. La fuente de luz constante es un laser muy estable que emite continuamente una potencia y longitud de onda fija. No se ve afectado por las variaciones que sufra la señal eléctrica durante la emisión de luz, por lo que no se produce chirrido frecuencia de modulación y el ancho de banda de su espectro óptico se mantiene al mínimo.

Los láseres que adoptan este tipo de modulación indirecta son relativamente complejos y de alto costo, pero su chirrido de frecuencia de modulación es muy baja. Se pueden utilizar en sistemas con velocidad de transmisión mayor o igual que 2,5G y distancias que alcanzan los 600 km, debido a su alto valor de tolerancia a la dispersión cromática (7.200 a 12.800 ps/nm) [14].

En el modulador Mach-Zehnder, la señal óptica proveniente del láser es separada en dos señales iguales que entran en dos ramas ópticas del modulador respectivamente. Estas dos ramas emplean un material electro-óptico cuyo índice de refracción cambia con la magnitud de la señal eléctrica externa aplicada a la misma. Estos cambios del índice de refracción de las

ramas ópticas dan lugar a una variación de las fases de cada señal. Por lo tanto, cuando las señales procedentes de las dos ramas se recombinan en el extremo de salida, la señal óptica combinada es una interferencia con mayor o menor intensidad. Con este método, la información de la señal eléctrica se transfiere a la señal óptica bajo una modulación de su intensidad, con la cual el chirrido de frecuencia puede llegar a ser igual a cero.

Los moduladores Mach-Zehnder son casi exclusivamente usados en sistemas de transporte de 40G y 100G debido a su estabilidad en la longitud de onda y la posibilidad de modular independientemente la intensidad y la fase del campo óptico, con una tolerancia a la dispersión cromática que supera los 12.800 ps/nm [14].

1.5.2 Formatos de modulación

Los enlaces ópticos con tasas inferiores a 10G por lo general utilizan fuentes con formatos de modulación NRZ (*Non-Return to Zero*) y RZ (*Return to Zero*). En la codificación NRZ más básica, la señal óptica es conmutada bajo el proceso OOK (*On-Off Keying*), o sea luz emitida / luz apagada para transmitir un simple código binario 1/0. El código RZ utiliza el mismo método OOK para transmitir información, pero en este método el pulso se pone en ON la mitad del ancho del pulso que en NRZ, esto hace que la potencia óptica por bit se reduzca aproximadamente a la mitad y reduciendo así el impacto de la no linealidad en la fibra.

Para disminuir los efectos de la no linealidad se utiliza el formato de modulación DRZ (*Differential Return-to-Zero*), el cual emplea codificación RZ, caracterizada por que introduce una diferencia de fase de 180° entre pulsos adyacentes. De esta manera, las señales superiores a 10G son menos sensitivas a los efectos de no linealidad de la fibra y además provee gran robustez sobre algunos impedimentos en la transmisión como CD, PMD y Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR), con una tolerancia ligeramente mejorada en comparación con NRZ. Sin embargo, DRZ tiene una limitación fundamental: no puede operar con separaciones de 50GHz debido al ancho espectral de la señal, que son necesarios para soportar sistemas DWDM de 80 canales, por lo tanto sólo podría manejar sistemas DWDM de hasta 40 canales y 100GHz de separación por canal.

1.6 Evolución hacia los sistemas de 40 y 100G

Debido al explosivo crecimiento del número de usuarios de internet, junto al constante desarrollo de los servicios de banda ancha (VoIP, IPTV, VoD, aplicaciones inalámbricas 3G / LTE, etc.), la industria de telecomunicaciones se ha visto en la necesidad de desarrollar, para los operadores de redes de transporte, dispositivos (IP Routers, Switches, Servidores, etc.) del lado cliente, con interfaces de 40 y 100 GbE o POS que respondan a estas necesidades de tráfico. Esto implica aumentar la capacidad de transmisión de los sistemas actuales que hoy operan a una velocidad de 10G.

Una forma de hacerlo es utilizar la técnica de multiplexación inversa, de tal manera que una señal de 40G es convertida en cuatro flujos de 10G, cada uno transportados por un canal del sistema DWDM existente sin realizar mayores cambios en la red actual, pero a la vez sin producir un aumento real de la capacidad. La otra opción es aumentar la tasa de transmisión del canal DWDM a 40G y 100G. De esta forma se mejora la eficiencia de la banda de frecuencia, se reducen los costos de operación, energía, espacio físico, etc., y se incrementa la granularidad y capacidad del sistema.

La figura 1.4 muestra como ha sido la evolución de las interfaces tanto para los servicios TDM como para Ethernet [16]. El incremento del tráfico de banda ancha, y como consecuencia de la capacidad en las redes de transporte, desde mediados de los 80's hasta la fecha de hoy ha sido exponencial. Los organismos internacionales dedicados a desarrollar normas y especificaciones de redes de telecomunicaciones, tales como IEEE, ITU y OIF, se han visto en la necesidad de unir esfuerzos para trabajar aceleradamente en la definición de los estándares para las interfaces del lado cliente y del lado red, con el fin de garantizar la interfuncionalidad entre los equipos de distintos fabricantes, que operen a tasas de transmisión superiores a 10G.

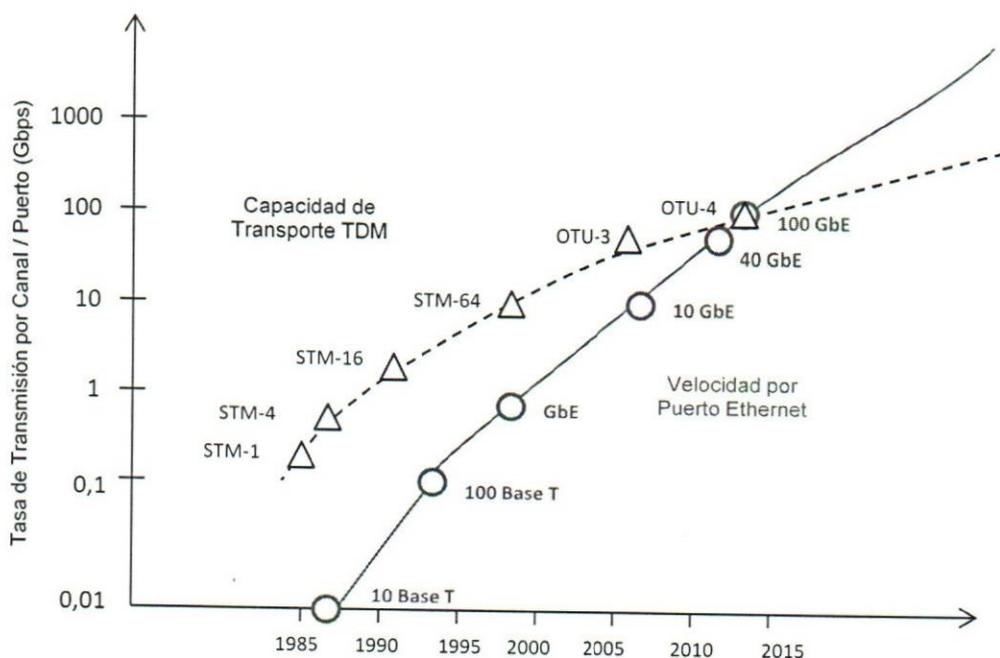


Figura 1.4 Evolución hacia los 100G de las Interfaces TDM / Ethernet

Al aumentar la tasa de transmisión a 40G y 100G, se disminuye el ancho del pulso, por lo tanto la señal óptica es menos tolerante ante los fenómenos presentes en la fibra como son, la dispersión cromática (CD) y la dispersión de modo de polarización (PMD). Por otro lado cuando se transmite a 40G o a 100G de la misma forma que a 10G, utilizando modulación OOK, el ancho espectral de la señal sería 4 y 10 veces mayor que con 10G. O sea, sólo un cuarto o un décimo de energía estarían disponibles por cada bit, comparada con una señal de 10G (suponiendo que la potencia global de ambas señales es constante). Esto significa que la señal necesitaría una potencia 4 y 10 veces mayor para sostener la misma OSNR. Un aumento de la potencia óptica haría que los efectos no lineales como SPM, XPM y FWM se hagan más evidentes, limitando de esta forma el número de canales en un sistema DWDM. Todo esto constituye un grupo de factores de restricción que limitan la evolución de los sistemas ópticos a velocidades de 40G y 100G.

1.7 Técnicas para contrarrestar los factores de restricción a 40 y 100G.

Como se ha visto los sistemas DWDM de larga distancia que transportan señales 10G, se ven afectados tanto por el fenómeno dispersión cromática presente en la fibra, el cual produce la interferencia inter-símbolo (ISI), limitando la longitud del enlace, así como por el ruido ASE introducido por los amplificadores EDFA, que disminuye el valor de OSNR. El primero de ellos es mitigado con el uso de módulos compensadores de dispersión cromática (DCM), y el segundo a través de códigos de detección y corrección de errores FEC, el cual disminuye el BER de la señal y por ende los requerimientos de OSNR. Sin embargo, a 40 y 100G estos métodos de compensación no son suficientes, además de las restricciones introducidas por el PMD, por lo que se hace necesario recurrir a otros esquemas de modulación que permitan contrarrestar estos fenómenos, aumentando la tolerancia a sus efectos; tales como ODB, DQPSK y DP-QPSK, así como técnicas de Detección Coherente y la detección y corrección de errores FEC, los cuales se detallan a continuación.

1.7.1 ODB (Optical Duobinary)

ODB comparado con NRZ, la modulación *Optical Duobinary* presenta una mejor eficiencia espectral y una mayor tolerancia a la dispersión cromática. ODB es un esquema de modulación que permite transmitir una tasa de R bits/s utilizando menos de $R/2$ Hz de ancho de banda. Varias formas de implementar ODB han sido propuestas, sin embargo, la aplicación basada en las señales eléctricas de tres niveles generadas por filtros pasa-bajo eléctricos (LPF), es el más rentable y al mismo tiempo muestra la mejor tolerancia a la dispersión [12].

Los transmisores convencionales ODB utilizan un pre-codificador diferencial en la entrada. La secuencia pre-codificada es convertida en señales eléctricas de tres niveles (-1, 0, 1) mediante el uso de un filtro eléctrico de paso bajo, cuya frecuencia de corte es igual a un cuarto de la tasa de bits (a esto también se denomina filtro duobinario). Finalmente se modula la luz con la señal duobinaria, lo que implica una señal óptica de tres niveles. Esto se logra con un MZM centrado en su punto nulo. Con un 0 en la señal de entrada no se transmite luz, pero 1 y -1 se transmite como $+E$ y $-E$ el campo eléctrico de la señal óptica respectivamente.

Una propiedad importante de una señal correlacionada como ODB es que todas las posibles secuencias de los tres valores no pueden ocurrir. Por ejemplo, una secuencia de datos NRZ $\{1, 0, 1\}$ es mapeada dentro del dominio óptico como $\{+E, 0, +E\}$. En una señal codificada ODB la secuencia $\{1, 0, 1\}$ no puede ocurrir, en su lugar ocurre $\{1, 0, -1\}$, por lo que se le asigna a $\{+E, 0, -E\}$ en el dominio óptico. El efecto de la dispersión en estos dos casos se muestra en la Figura 1.5, que indica claramente la mitigación de la dispersión en caso de ODB. Adicionalmente, el ancho de banda en el punto de 3 dB de ODB es de aproximadamente 25% de la anchura de banda de NRZ, por lo que la eficiencia espectral de ODB es mayor que la de NRZ [12].

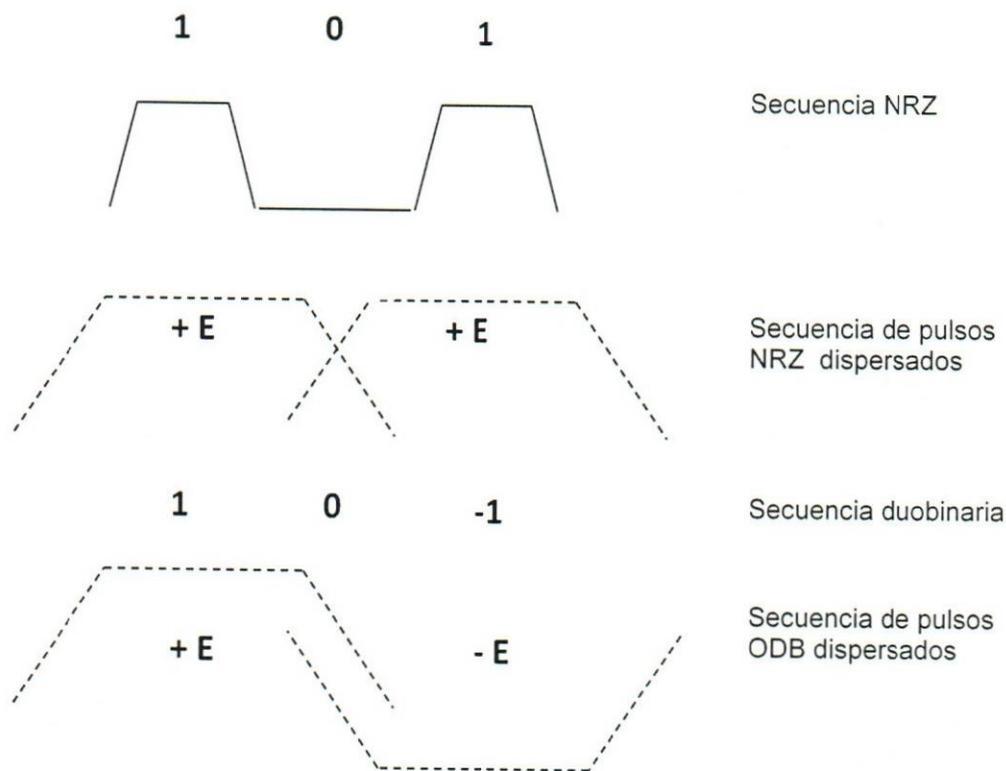


Figura 1.5. Secuencia de pulsos NRZ y ODB dispersados

1.7.2 DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying)

Hoy en día, la mayoría de sistemas DWDM tienen una separación de canales de 50 GHz, lo que implica una eficiencia espectral 0,8 bps / Hz para una tasa de 40G. Para los formatos binarios, como ODB o DPSK, esto está cerca del límite teórico, lo que dificulta el tener múltiples equipos ROADMs en cascada a lo largo de un enlace de transmisión. Los formatos multinivel tienen espectro óptico más estrecho, por lo tanto permiten una alta eficiencia espectral, así como la posibilidad de conectar en cascada múltiples ROADMs. Además, aumentan significativamente la tolerancia a la dispersión cromática y el PMD, debido que la tasa de símbolo es menor [13].

DQPSK es un formato de modulación multinivel en la que la tasa de bits es dos veces la tasa de baudios, por lo tanto, es muy adecuado para el sistema de transmisión de alta velocidad. En el extremo transmisor, las señales eléctricas de entrada son codificadas diferencialmente; luego, se realiza la modulación por desplazamiento de fase y cuadratura obteniéndose a la salida una señal óptica en cuatro fases (cada una con 2 bits): $\pi/4$; $3\pi/4$; $5\pi/4$ y $7\pi/4$, las cuales representan 11, 01, 00 y 10 respectivamente (ver figura 1.6). En el lado de recepción, se descodifican diferencialmente las señales ópticas y las mismas son recibidas de manera ecualizada. La sensibilidad del receptor en el formato de modulación DQPSK es 3 dB mayor que la del formato de modulación de amplitud [13].

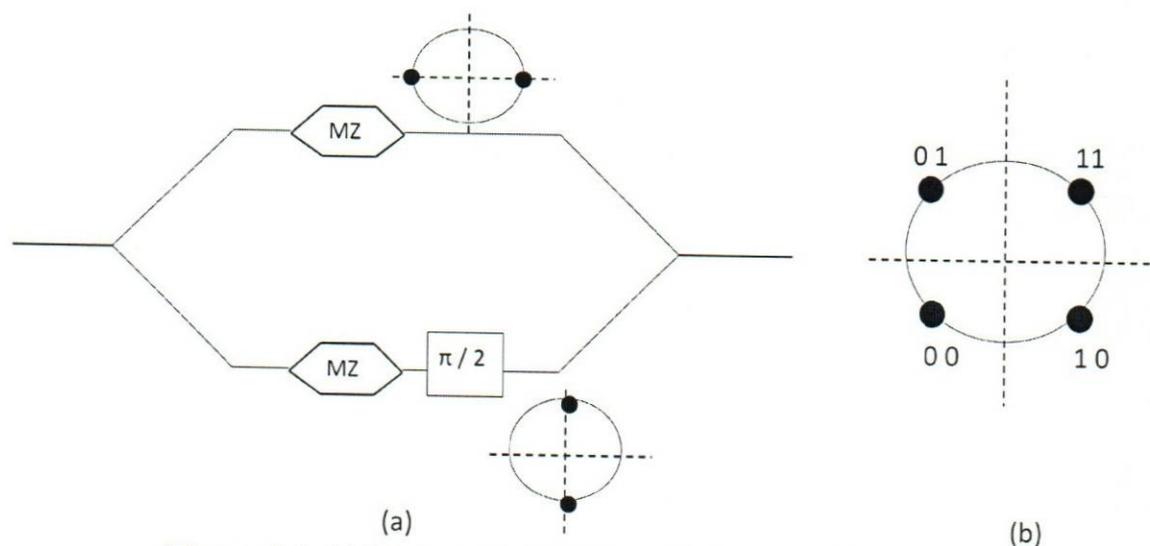


Figura 1.6. (a) Modulación QPSK (b) Constelación

En el formato de modulación DQPSK, el ancho del espectro es estrecho y el cambio de fase ayuda a reducir los efectos no lineales de la fibra (como SPM, XPM y FWM) y mejorar la tolerancia a la dispersión cromática y la dispersión de modo de polarización.

1.7.3 DP-QPSK (Dual Polarization- Quadrature Phase Shift Keying)

La principal diferencia entre las señales ópticas y eléctricas es que las señales ópticas inducen efectos únicos de polarización. Una onda de luz tiene dos modos independientes y ortogonalmente polarizados en el plano perpendicular a la dirección de transmisión, que generalmente se llama polarización-X (X-pol) y polarización-Y (Y-pol) respectivamente. Usando esta propiedad de las señales ópticas, la polarización dual (DP) modula por separado las dos polarizaciones ortogonales. Tomando los 112 Gbps de la velocidad de línea como un ejemplo, la X-pol y Y-pol de la señal óptica se pueden utilizar para llevar una señal de 56 Gbps cada una por separado, y la señal en cada polarización puede ser modulada en QPSK. En realidad hay cuatro sub-canales de transmisión de la señal óptica: un canal en fase (canal I) y un canal de cuadratura (canal Q) en cada uno de las polarizaciones (X-pol y Y-pol). Mediante el uso de los sub-canales, la velocidad de transmisión de la señal óptica se reduce a 28 Gbaud.

La Multiplexación por Polarización Dual proporciona los siguientes beneficios [14]:

Primero, mediante el uso de un modulador DP-QPSK, la velocidad de transmisión para una señal de línea de 112 Gbps puede ser reducida a 28 Gbaud, lo que reduce de manera significativa el requisito de ancho de banda de los dispositivos fotoeléctricos. Además, gracias a la DP-QPSK, las técnicas actuales para la fabricación de dispositivos fotoeléctricos de 40G también se pueden utilizar para la fabricación de dispositivos fotoeléctricos 100G, lo que ayuda a reducir la inversión inicial en la construcción de la red.

En segundo lugar, la técnica de modulación DP-QPSK reduce el ancho espectral de las señales ópticas, lo que en gran medida mejora la eficiencia espectral a 0,2 bps/Hz a 2 bps/ Hz, posibilitando la separación entre canales de 50 GHz en sistemas DWDM de alta velocidad.

En tercer lugar, la reducción el ancho espectral de las señales ópticas reduce a su vez el requerimiento de OSNR y los efectos no lineales de la fibra, y al mismo tiempo mejora la tolerancia a la dispersión cromática y PMD.

La figura 1.7 ilustra cómo se realiza la modulación DP- QPSK y la respectiva constelación de las señales [14]. Se observa como una señal de entrada de 112 Gbps es convertida en cuatro sub-canales de transmisión de la señal óptica: un canal en fase (canal I) y un canal de cuadratura (canal Q) en cada uno de las polarizaciones (X-pol y Y-pol). Mediante el uso de los sub-canales, la velocidad de transmisión de la señal óptica se reduce a 28 Gbaud.

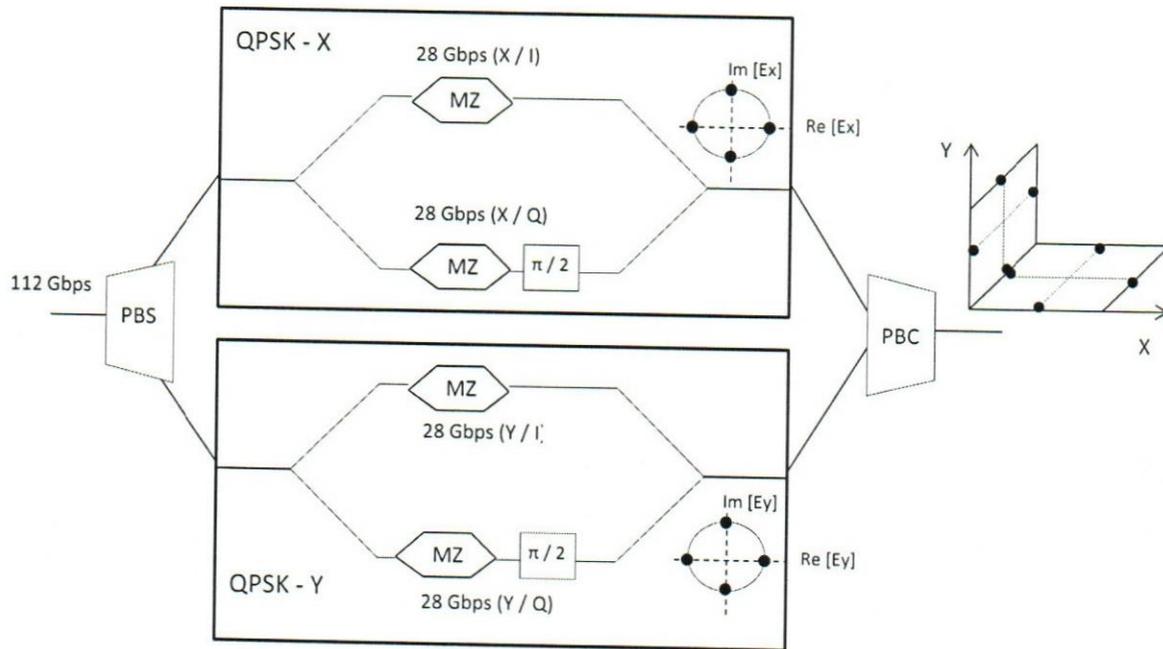


Figura 1.7. Modulación DP – QPSK 100G

1.7.4 Detección coherente

Como ya se ha visto, una señal DP-QPSK tiene dos polarizaciones ortogonales, cada una con un canal I y canal Q. Los cuatro canales llevan la información y por lo tanto deben

ser demodulados. El método de detección directa tradicional no puede distinguir entre pol-X y pol-Y, o entre los canales I y Q.

La tecnología de detección coherente permite detectar el canal I y canal Q en el dominio óptico. La estructura y el principio de funcionamiento de un detector coherente de 100G se encuentra ilustrado en la figura 1.8. La señal óptica de entrada es separada en dos señales ortogonales (pol- X y pol- Y) por medio de un PBS (*Polarization Beam Splitter*). Cada una de ellas es interferida con la señal óptica de un oscilador local (que tiene la misma polarización y frecuencia de la señal recibida) a través de un Mezclador híbrido óptico de 90°. A la salida del Mezclador, las señales son enviadas por separado a los fotodiodos para su foto-detección y obtener los respectivos campos eléctricos I y Q de cada polarización [14].

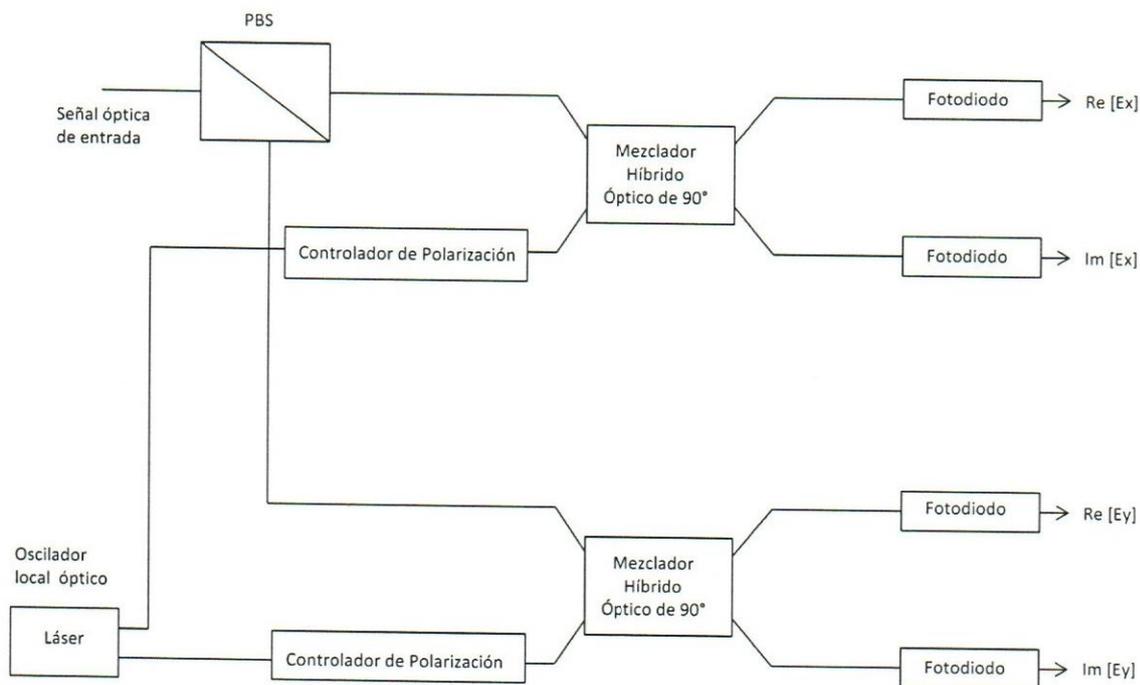


Figura 1.8. Estructura y principio de funcionamiento de un Detector Coherente

Además de obtener simultáneamente la polarización, la amplitud, y la información de fase para el campo óptico, la detección coherente ofrece una tolerancia mayor al OSNR que en sistema con detección directa. Esta característica contribuye de manera significativa a ampliar

la distancia de un sistema de transmisión de 100G. Por ejemplo, cuando el pre-FEC BER es 1×10^{-3} , la tolerancia al OSNR en un sistema QPSK coherente es 2,4 dB (valor teórico) mayor que en un sistema DQPSK de detección directa, a la misma velocidad de transmisión. Otra característica de la detección coherente, es que la potencia recibida por un fotodiodo es proporcional a la raíz cuadrada del producto de la potencia óptica de la señal y la potencia óptica del oscilador local. Por lo tanto, cuando la potencia óptica de la señal de entrada es baja, se puede aumentar adecuadamente la potencia del láser del oscilador local para garantizar que la potencia óptica recibida se encuentre dentro del rango de sensibilidad del fotodiodo, lo cual resuelve el problema del presupuesto de potencia en el lado de recepción [14].

A pesar del costo y la complejidad de los receptores, el sistema de detección coherente tiene muchas ventajas sobre las tecnologías de detección directa tradicionales. En primer lugar hay un incremento de la sensibilidad del receptor de 15 a 20 dB, comparado con los sistemas de detección directa. Adicionalmente, la detección simultánea de la amplitud, fase y polarización de la señal óptica permite obtener información más detallada, que se extraerá y transportará, lo que aumenta la tolerancia a la dispersión cromática y mejora el rendimiento del sistema. Por último, existe un mejor rechazo a la interferencia de canales adyacentes en sistemas DWDM, permitiendo un mayor número de canales ópticos dentro de la misma banda de transmisión [15].

1.7.5 FEC (Forward Error Correction)

Desplegar sistemas de 100G utilizando la infraestructura DWDM existente de 10G, implica un aumento de 10 veces en la velocidad de transmisión, lo que se traduce en una reducción de 10 veces en la relación señal a ruido óptica (OSNR). Como se ha visto, una de las técnicas que se pueden utilizar para reducir el déficit OSNR es a través modulación DP-QPSK en conjunción con un receptor coherente. Sin embargo, incluso después de tomar ventaja de todas estas técnicas, se mantiene un déficit de OSNR significativo [16].

El *Forward Error Correction* (FEC) ha sido siempre una de las tecnologías clave para reducir los requerimientos de OSNR. Esta técnica consiste añadir a la trama, una secuencia de bits de redundancia codificados con un formato específico antes de ser transmitida. Luego en

el extremo receptor, se decodifica la señal utilizando el algoritmo específico, con el fin de detectar y corregir los errores de bits que haya podido sufrir la señal original durante su transmisión.

La tecnología FEC primera generación utiliza el algoritmo de codificación RS (255, 239) que cumple con ITU -T G.975.1. Su *overhead* es de 7 % y la ganancia de codificación neta es de 6,3 dB, lo que garantiza un pre-FEC BER límite de 8.3×10^{-5} . Se aplica principalmente a los sistemas de transmisión de 2.5G y 10G.

La necesidad de alcanzar mayores distancias a mayor velocidad de transmisión, implican que el pre-FEC BER deba ser disminuido. Este requisito acelera la aparición de la segunda generación de FEC, que mediante el uso de códigos concatenados, proporciona una ganancia neta de codificación de 8 a 9 dB y un pre-FEC BER de 1×10^{-3} a 4×10^{-3} . [17]. El aumento en la ganancia de codificación neta a su vez conduce a una alta complejidad en el algoritmo y a un aumento en el recuento de errores.

Impulsado por las aplicaciones de la tecnología 40G y 100G con detección coherente, se introdujo la tercera generación FEC sobre la base de la decisión por *software*. Soft-decision es un método de decodificación basado en valores de probabilidad. En este método, se cuantifican los valores de tensión muestreados desde el demodulador, y el decodificador de soft-decision decodifica los códigos algebraicos. En un canal de ruido gaussiano blanco, los códigos de soft-decision producen una ganancia de codificación 2 dB más alto que los códigos de decisión por *hardware* [14].

El objetivo principal de este capítulo ha sido describir con detalle los conceptos fundamentales de un sistema DWDM, las características de los distintitos tipos de fibra óptica, los factores que afectan la transmisión y los esquemas de modulación utilizados en los sistemas DWDM actuales que operan a 10G; así como la evolución hacia los sistemas 40G y 100G y las técnicas existentes que pueden ser utilizadas para contrarrestar los factores de restricción presentes en la fibra para transmitir a estas velocidades. Este marco teórico le permitirá al lector comprender mejor los criterios utilizados para la elaboración de la propuesta de migración de los sistemas DWDM que operan a 10G a sistemas de 40G y 100G.

CAPITULO II

ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

En este capítulo se presenta una breve descripción de la situación actual de las redes de transmisión por fibra óptica en el país, el despliegue y la arquitectura de los sistemas, así como las técnicas utilizadas para mitigar los factores que limitan la transmisión a 10 Gbps.

2.1 Descripción de las redes de Transmisión por fibra óptica

Las velocidades de acceso, tanto en las redes fijas como en las móviles, han evolucionado de forma muy acelerada en la última década. La introducción de tecnologías como ADSL, FTTx, Cable modem y redes inalámbricas con tecnologías 3G y LTE, junto con dispositivos y precios asequibles, han fomentado la rápida adopción no sólo del acceso en sí mismo, sino de servicios intensivos en el tráfico, como el video bajo demanda o el uso de las redes sociales.

Durante más de una década los operadores han soportado el crecimiento del tráfico con redes ópticas de 2,5G, 10G, y ahora llegamos a la era de los 40G y 100G. Los sistemas actuales han sido configurados y dimensionados en base a este crecimiento, y la tecnología utilizada ha sido producto del esfuerzo de los fabricantes por adecuarse a los distintos fenómenos presentes en la fibra óptica que influyen negativamente en la transmisión al aumentar la velocidad.

En Venezuela, según datos del Observatorio Estadístico de CONATEL [18], el número de suscriptores de Internet con acceso fijo de banda ancha ha crecido un 146% en los últimos cuatro años. Por su parte, en el mismo período, el número de suscriptores de banda ancha móvil se ha incrementado en un 248%; contabilizándose para finales del 2012 un total de

12.555.010 usuarios de Internet. A este crecimiento se le suma el aumento en la demanda en Megabits por usuario, producto de las nuevas aplicaciones, ocasionando de esta manera un incremento exponencial del tráfico, lo que se traduce en un mayor requerimiento de las capacidades de las redes de transporte.

De acuerdo a consultas privadas (que revisten un carácter confidencial de la información detallada), realizadas a los tres operadores de telecomunicaciones más importantes del país, existe en total alrededor de 16.300 kilómetros de cable de fibra óptica instalados a lo largo y ancho del territorio nacional, que comprenden sólo las redes de larga distancia; sin considerar las redes metropolitanas y de acceso (FTTx) que hay en todas las principales ciudades del país, así como las fibras disponibles en los cables de guarda de las redes de alta tensión (OPGW), propiedad de la compañía encargada de la transmisión y distribución de energía eléctrica.

Los cables de las redes metropolitanas se encuentran tendidos en ductos y sub-ductos, y en su mayoría son de 12 y 24 fibras del tipo G.652 estándar; las instalaciones más recientes han sido realizadas con fibras G.652 D. Su arquitectura está conformada por anillos auto-soportados SDH (100% del tráfico protegido en sentido contrario del flujo de la señal, al producirse un corte de fibra en uno de sus tramos) y redes Metro-Ethernet sobre sistemas CWDM con capacidad de 16 lambdas (longitudes de onda). La distancia promedio entre dos nodos adyacentes es de 5 km y la máxima distancia de un enlace no supera los 40 km, por lo que no requieren del uso de amplificadores ópticos intermedios, manteniéndose de esta forma los valores de OSNR dentro de los límites aceptables por los fotodetectores.

Por su parte, los cables de fibra óptica que conforman las redes de larga distancia, utilizan distintas formas de tendido. En su mayoría están directamente enterrados sin ductos; otros tramos utilizan tendido aéreo a través de postes, y hay aproximadamente 1.200 kms que corresponden al cable submarino que recorre toda la costa venezolana, desde el estado Zulia hasta el estado Sucre con 11 puntos de amarre. En esta red existen cables de 24, 36 y 48 fibras del tipo G.653, G.655 y algunos tramos con G.652 D. En la figura 2.1 se muestra el tendido los cables que conforman la Red Nacional Integrada de Fibra Óptica del Estado.

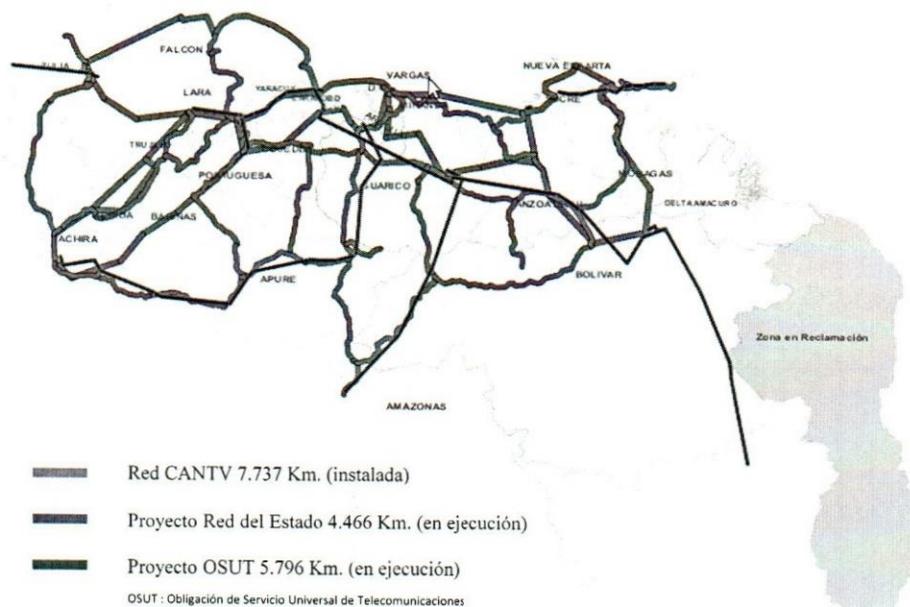


Figura 2.1. Red Nacional Integrada de Fibra Óptica del Estado [27]

La mayoría de los sistemas que conforman la red troncal de larga distancia, están configurados en forma de anillos interconectados con un promedio de 8 a 12 nodos por cada anillo, y cuya mayor distancia entre dos nodos adyacentes no supera los 250 km. Existen además algunos nodos con rutas de fibra de 3 y 4 direcciones que permiten la conformación de redes malladas. En lo que respecta a la red secundaria, que interconecta los nodos principales de la red troncal con los nodos que sirven a las ciudades menos pobladas, está conformada por anillos SDH y enlaces lineales en forma de bus de menor jerarquía (STM-4/16).

Los anillos SDH auto-soportados MS-SPRING (*Multiplex Section Shared Protection Ring*) operan en algunos casos directamente sobre 2 o 4 fibras, a velocidades de transmisión de 2,5G y 10G. Sin embargo en otros casos, producto del agotamiento de los pares de fibra en ciertos tramos, estos han tenido que ser migrados a los sistemas DWDM a través de unidades transpondedoras con interfaces STM-16 y STM-64 respectivamente. Por su parte los equipos que componen los sistemas DWDM están configurados para operar con 40 lambdas, aunque poseen la capacidad de ser ampliados hasta 80 lambdas con un espaciamiento de 50 GHz. Las

Unidades Transponedoras Ópticas (OTU) pueden sintonizarse a cualquiera de las 80 frecuencias dentro de la grilla ITU-T 694.1 del lado WDM, y sus interfaces de acceso pueden ser configuradas para transportar los distintos tipos de servicios desde 100 Mbps a 10 Gbps (STM-1/4/16/64, FE/GbE/10GbE, etc.). Sin embargo, debido a los factores de restricción presentes en las fibras ópticas, los sistemas DWDM no pueden operar al máximo de su capacidad.

La figura 2.2 muestra un esquema de la arquitectura actual de los sistemas de transmisión por fibra óptica en cada una de la capas de la Red.

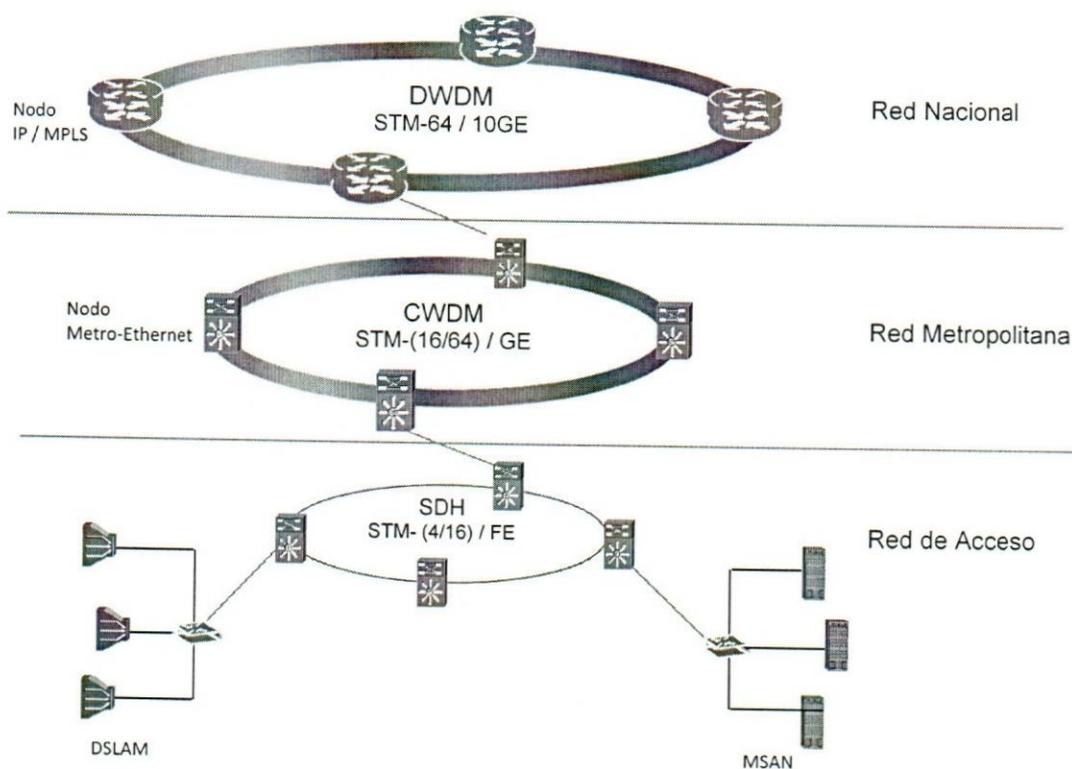


Figura 2.2. Arquitectura actual de la Red de Transmisión por Fibra Óptica

Por una parte, producto de la atenuación de la fibra y las pérdidas de inserción en empalmes, conectores y los otros elementos pasivos como multiplexores y demultiplexores, para poder cumplir con el presupuesto de potencia se requiere del aumento de la potencia en

los transmisores, así como el uso de varios amplificadores ópticos en los tramos más largos. Esto trae consigo dos consecuencias importantes; la primera es una disminución de la OSNR debido al aumento del ruido (ASE) introducido por los amplificadores EDFA, lo cual reduce significativamente la longitud del enlace sin regeneración. Y la segunda consecuencia es la aparición de los efectos no lineales (XPM y FWM), producto del aumento de la intensidad de la radiación transmitida a la fibra, limitando de esta manera la cantidad de longitudes de onda dentro de la banda de operación del sistema DWDM.

El otro factor, cuando la tasa de transmisión alcanza los 10 Gbps, es la dispersión cromática. Como se explica en la sección 1.4.2 del capítulo I, ésta origina un ensanchamiento del pulso, que se incrementa con la distancia del enlace y el ancho espectral de la fuente. La razón por la que este ensanchamiento es nocivo, se debe a que entre mayor sea éste, empieza a existir interferencia entre símbolos (ISI), ocasionando que el receptor no pueda distinguir entre 1's y 0's. Esto a su vez ocasiona que el BER aumente, cayendo de esta manera en una penalización de potencia.

En otras palabras, el deterioro de la señal debido a la dispersión se debe compensar con una cantidad adicional de potencia llamada "penalización de potencia". Esto significa que el nivel de recepción deberá ser calculado con un margen mucho mayor al valor de sensibilidad del fotodetector. Para sistemas OOK-NRZ operando a 10 Gbps y con un BER de 10^{-12} , sobre fibras G.652 y longitudes de onda alrededor de los 1550 nm, las distancias máximas de transmisión para valores de penalización de potencia de 0.5, 1 y 2 dB pueden alcanzar los 45 km, 67 km y 107 km respectivamente, mientras que para fibras G.655 las distancias pueden llegar a los 174 km, 261 km y 418 km respectivamente [14]. En el caso de las fibras G.653, este factor no es una limitante debido al desplazamiento del punto de cero dispersión a la ventana de 1.550 nm.

Con el uso de diferentes métodos para contrarrestar los efectos de la dispersión cromática como nuevas formas de modulación y codificación, módulos de fibras compensadoras de dispersión (DCM) y la utilización de códigos correctores de errores (FEC), se logra que la limitación en la distancia de transmisión se encuentre regida por la atenuación y no por el ensanchamiento del pulso. En el caso particular de los enlaces de las redes

metropolitanas (a 10 Gbps), el ensanchamiento del pulso debido a la dispersión no conlleva a mayores limitaciones del sistema debido a la relativamente baja longitud de los enlaces (menor a 40 km). Sin embargo, en los enlaces de larga distancia con un gran número de secciones o *spans* (distancia entre amplificadores), los efectos de la XPM y FWM son acumulativos, ocasionando que, aunque exista amplificación de la señal o compensación de dispersión, la degradación por efectos no-lineales permanezca. Es el caso de los tramos con fibras del tipo G.653; la ausencia de dispersión cromática en la fibra a 1550 nm, hace que estos efectos se presenten en mayor medida, por lo que el número de lambdas que pueden ser usadas en los sistemas DWDM es limitado.

El fenómeno de dispersión por modo de polarización (PMD), sólo llega a ser una limitante en los enlaces con tasas de transmisión de 10 Gbps, cuando las distancias superan los 400 Km con fibras cuyo PMD alcanza los $0,5 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$ [2] [9]. En estos casos, se produce una penalización adicional en la OSNR. Las técnicas de compensación existentes no son suficientes, por lo surge la necesidad de utilizar métodos que puedan minimizar sus efectos, como sería el caso de códigos de línea de alto orden como DRZ, ODB, etc., o el uso de regeneradores 3R (*Reshape – Retime – Regeneration*).

Como se ha podido apreciar, la velocidad máxima de los sistemas actualmente instalados en el país es de 10 Gbps; sin embargo, debido al crecimiento sostenido del número de clientes de banda ancha, el desarrollo de las interfaces de 40 y 100G en los equipos *switches* y *routers*, los requerimientos de ancho de banda de las nuevas aplicaciones, y sumado a esto, las limitaciones de crecimiento en el número de canales de los sistemas DWDM debido a los factores de restricción de la fibra, se hace imperativo la necesidad de migrar los sistemas actuales a velocidades mayores y así hacer frente a la demanda futura.

CAPÍTULO III

PROPUESTA DE MIGRACIÓN A 40G Y 100G

En este capítulo se describe una propuesta de migración, a través de la cual se analizan algunos de los posibles escenarios, basados en las características de las redes de transporte existentes en el país, el estado del arte de la tecnología para sistemas de 40G y 100G, y la experiencia de otros operadores de telecomunicaciones a nivel mundial en lo que respecta a la ampliación de la capacidad de sus redes de transmisión, pruebas de campo, etc.

3.1 Antecedentes para la migración

Los operadores comerciales de redes de Telecomunicaciones a nivel mundial, señalan una tendencia a largo plazo de crecimiento del tráfico a un ritmo de 50 % anual o más. Teniendo en cuenta su carga de tráfico de red actual y las tasas de crecimiento, dichos operadores han expresado una necesidad urgente de incrementar la capacidad de sus redes de transporte mediante el aumento de las tasas de los canales ópticos a 40 y 100 Gbps, manteniendo el espaciamiento de canal óptico en 50 GHz, usando para ello los sistemas actualmente desplegados, sin necesidad de instalar fibras adicionales o nuevos amplificadores ópticos, y tomando en cuenta la compensación por dispersión cromática [18].

Una consideración adicional, es la posibilidad de mantener la máxima separación entre regeneradores, que en las redes actuales de larga distancia está en el intervalo de 1000 a 1500 km. Con esta distancia es común tener de 6 a 12 ROADMs conectados en cascada en cada enlace. Los canales a 40 y 100 Gbps intrínsecamente requieren de una relación señal a ruido óptica (OSNR) mayor que los canales de 10 Gbps. Esto debido a que la potencia por bit en una señal de 40G es un cuarto de la potencia por bit comparada con una señal de 10G, y en el caso de una señal de 100G es diez veces menos, lo cual supone un requisito muy estricto en la

tolerancia al ruido originado por los amplificadores ópticos EDFA existentes, debido a la emisión espontánea amplificada (ASE).

Otros factores a considerar para la migración son el umbral financiero, el consumo de potencia y la densidad de los equipos. En este sentido el costo global de bps / km debería ser menor en un enlace de 40G o 100G, que los que se tienen actualmente en los enlaces de 10G para la misma capacidad de transmisión. Esto es, al sumar los costos de las nuevas unidades que componen un sistema de 40G y/o 100G la cantidad total resultante debería ser menor a la que se obtendría ampliando con sistemas de 10G para transportar el mismo tráfico. Por otro lado, tanto la cantidad de equipos (*hardware*) involucrados en la migración, lo cual se traduce en una reducción de espacio físico, así como la disipación de potencia en relación a cada bit por segundo, debería traer ahorros significativos.

3.2 Escenario de migración a 40G

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, aparte del coeficiente de atenuación, existen otros fenómenos en la fibra óptica que limitan la distancia de transmisión de los enlaces DWDM cuando se desea incrementar la velocidad de transmisión. Estos fenómenos son la Dispersión Cromática (CD), la Dispersión de Modo de Polarización (PMD) y los efectos no lineales, tales como la Modulación de Fase Cruzada (XPM) y la Mezcla de Cuatro Longitudes de Onda (FWM). Las redes DWDM actuales que operan a 10 Gbps, han sido adecuadas con el uso de amplificadores ópticos (OA) y módulos compensadores de dispersión cromática (DCM), de forma tal que le permiten alcanzar grandes distancias sin el uso de regeneradores intermedios, tal como se aprecia en la figura 3.1. Dado que uno de los requisitos es incrementar la capacidad del sistema sin instalar nuevas fibras, ni realizar mayores cambios en las redes actuales, es necesario recurrir a otras técnicas que aumenten la tolerancia a estos factores de restricción, cuando se incrementa la velocidad de transmisión a 40 Gbps.

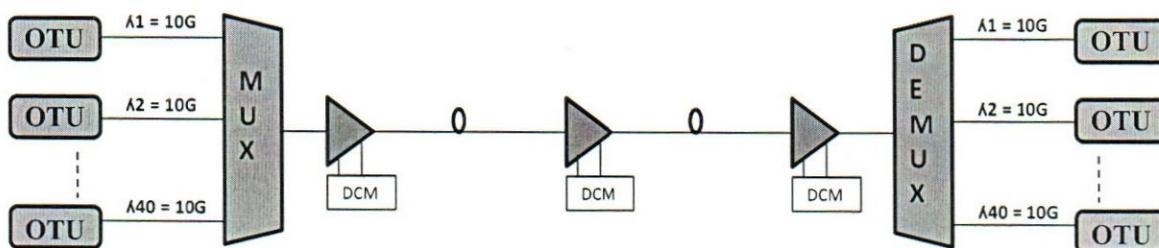


Figura 3.1 Esquema de un sistema punto a punto DWDM de 40λ que opera a 10G

Una forma de hacerlo es utilizar la técnica de multiplexación inversa, de tal manera que una señal de 40G es convertida en cuatro flujos de 10G, cada uno transportados por un canal del sistema DWDM existente; así no habría necesidad de realizar ningún cambio en la configuración de la red actual. Como puede verse en la figura 3.2, se tiene un sistema DWDM configurado para trabajar con longitudes de onda a 10G; los Amplificadores Ópticos y Módulos de Compensación por Dispersión, están calculados para contrarrestar los efectos de la fibra a la tasa de transmisión de 10G, no así para una señal de 40G. Es por ello que la trama de 40G se multiplexa de manera inversa en cuatro flujos de 10G, reconstruyendo luego el flujo original de 40G en el extremo receptor. Sin embargo, esta técnica no produce un incremento real en la capacidad del sistema; de hecho implica un uso acelerado del número de canales (lambdas) disponibles en el sistema, provocando que se agoten en menor tiempo.

Señal del Cliente

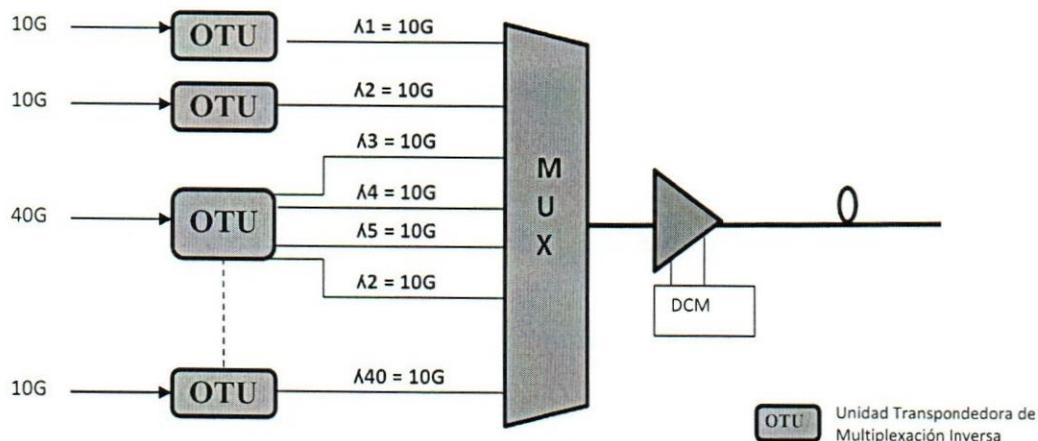


Figura 3.2. Transporte de una señal de 40G en un sistema DWDM de 10G usando la técnica de Multiplexación Inversa

Tampoco resulta económicamente factible migrar todos los canales que actualmente operan a 10G, a sistemas de 40G, si quedan todavía lambdas disponibles. Ya que existe una inversión hecha en las interfaces de 10G que todavía no han llegado a su vida útil (a pesar de que la tecnología de 40G ya alcanzado una madurez relativa, y los costos globales de un enlace de 40G están por debajo del costo de cuatro canales de 10G). Es por ello que en principio se tendrán redes híbridas con lambdas de 10G y 40G dentro de una misma banda de un sistema DWDM, en los cuales habrá que considerar de cada uno de los factores de restricción y las técnicas disponibles para mitigar su efecto individual en los enlaces de 40G.

3.2.1 La tolerancia a la Dispersión Cromática (CD)

Para una señal óptica que se propaga dentro de una fibra, la tolerancia a la Dispersión Cromática (CD por sus siglas en inglés: *Chromatic Dispersion*) es inversamente proporcional a su anchura espectral y directamente proporcional al ancho del pulso. Cuando la velocidad de transmisión aumenta al cuádruple, la anchura espectral de la señal óptica también aumenta cuatro veces, mientras que el ancho del pulso se reduce a 1/4. Como resultado de ello, la tolerancia a la CD de una señal de 40G se reducirá a 1/16 de su valor con respecto a una señal que viaje a 10G por la misma fibra. Esto implica que se produciría una mayor Interferencia Inter Símbolo (ISI) en la trama, lo cual se traduce en un aumento del la tasa de error de bits (BER).

En un sistema DWDM se utilizan Módulos Compensadores de Dispersión (DCM) fijos de 20, 40, 60, 80, 100 y 120 km, estandarizados según la recomendación ITU-T 671 (ver tabla 3.1). De esta forma la dispersión residual en el lado de recepción puede controlarse dentro de un rango que pueda ser tolerado por el receptor. El DCM se coloca por lo general en el extremo receptor de estación terminal óptica (OTM) antes del de-multiplexor, o en una estación intermedia de amplificación de línea óptica (OLA).

Tabla 3.1 Compensadores (pasivos) de Dispersión Cromática (Rec. ITU-T 671)

DCM (tipo)	Distancia a compensar (km)	Fibra G.652		Fibra G.655	
		Pérdidas de Inserción (dB)	DGD del DCM (ps)	Pérdidas de Inserción (dB)	DGD del DCM (ps)
A	20	< 3.1	< 0.4	< 3.7	< 0.4
B	40	< 4.5	< 0.5	< 4.5	< 0.5
C	60	< 5.8	< 0.6	< 5.5	< 0.7
D	80	< 7.1	< 0.7	< 6.3	< 0.8
E	100	< 8.2	< 0.8	< 7.6	< 0.9
F	120	< 9.0	< 0.8	< 8.2	< 0.9

Valores medidos bajo el método IEC 61300-3-4 / IEC 61300-3-4 [26]

Tomando como ejemplo una señal de 10G con código de línea NRZ, la tolerancia a la dispersión cromática es de aproximadamente 1200 ps/nm [19], lo cual implica que habría que colocar un DCM cuando la longitud del enlace alcance los 70 km sobre una fibra G.652 en la ventana de 1.550 nm. Sin embargo para una señal de 40G que usa el mismo medio y código de línea, la tolerancia a la dispersión cromática está alrededor de los 40 ps/nm, lo que equivale a sólo 2 km de dispersión residual que el enlace es capaz de tolerar sin compensación. Si ambas señales viajan por dos canales (λ s) diferentes de un mismo sistema DWDM, los DCMs colocados a lo largo de la línea para compensar la dispersión del enlace de 10G, no son suficientes para el enlace de 40G, por lo que se requiere utilizar otras técnicas de modulación y codificación que ofrezcan mayor tolerancia a la dispersión cromática. La tabla 3.2 resume algunos valores de tolerancia a la dispersión cromática, para distintos esquemas de modulación a 10G y 40G [14].

Tabla 3.2 Valores de tolerancia a la dispersión cromática en ps/nm, para distintos esquemas de modulación a 10G y 40G.

	Tolerancia a la Dispersión Cromática (ps / nm)			
	NRZ	ODB	DRZ	DQPSK
10G	1200	4800	800	
40G	40	± 500	± 400	± 500

Tomando en cuenta estos valores y el coeficiente de dispersión cromática de la fibra óptica en ps/nm.km, se puede determinar las distancias máximas de dispersión residual que puede ser tolerada por un enlace, dependiendo del tipo de fibra y el esquema de modulación utilizado (ver tabla 3.3).

Tabla 3.3 Distancia máxima sin DCM en fibras G.652 y G.655

Tipo de Fibra		Longitud máxima sin DCM (km)			
		NRZ	ODB	DRZ	DQPSK
G.652	10 G	71	282	47	
	40 G	-2 a 2	-29 a 29	-24 a 24	-29 a 29
G.655	10 G	267	1067	178	
	40 G	-9 a 9	-111 a 111	-89 a 89	-111 a 111

Se observa que para las fibras G.655, utilizando esquemas de modulación como ODB o DQPSK, la transmisión a 40G puede tolerar hasta 111 km de dispersión residual. Los valores negativos de longitud en la tabla anterior significan que hubo una sobre compensación. Por ejemplo, si la distancia del tramo es 70 km y se utiliza un compensador tipo C (60 km) queda una longitud de 10 km sin compensar; si en cambio, se utiliza un tipo D, la dispersión residual es de - 10 km.

Por otra parte, en redes con nodos ROADM, la multiplexación y enrutamiento dinámico de los canales ópticos puede causar cambios de dispersión en la línea a través de la cual se transmite la señal, causando de este modo que la dispersión residual en el lado de recepción exceda el intervalo tolerable y deteriore la calidad del enlace. En este caso se utiliza la compensación de dispersión adaptativa, la cual puede implementarse de forma óptica, o eléctricamente a través de un Compensador de Dispersión Sintonizable (TDCM). Una vez que la señal de 40G ha sido de-multiplexada y convertida de óptica a eléctrica por el fotodetector, se envía a un circuito de igualación con control de realimentación para la comprobación de la calidad de la señal eléctrica después de igualada (BER). El procedimiento de implementación es simple y la respuesta es rápida, aunque el intervalo de compensación de dispersión es

estrecho, pero puede aplicarse para la compensación de dispersión de un canal en particular [14].

3.2.2 La tolerancia a la Dispersión de Modo de Polarización (PMD)

Al igual que la CD, la tolerancia a la Dispersión de Modo de Polarización (PMD) de una señal óptica modulada aumenta linealmente con el ancho del pulso. En otras palabras, una señal óptica con una tasa de transmisión más alta, tiene una duración de tiempo más corto y por lo tanto disminuye la tolerancia al PMD. Cuando la velocidad se incrementa 4 veces (de 10G a 40G), la tolerancia al PMD se reducirá a 1/4 de su valor a 10G. Para una señal óptica de 42,8 Gbps NRZ-OOK, la tolerancia al PMD es aproximadamente 2,3 ps. Por ejemplo, para un enlace de fibra de 1200 km recién implementado, el presupuesto de ingeniería para el PMD es generalmente 2,4 ps, que está cerca de la tolerancia de PMD de la señal de 42,8 Gbps NRZ-OOK [14].

Las fibras fabricadas antes de 1995 fueron producidas con imperfecciones significativas y presentan un valor de PMD muy alto ($> 0,5 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$), razón por la cual son consideradas de calidad desconocida para la PMD. Para las fabricadas a partir de esa fecha, el valor de PMD está dentro de los límites para una transmisión a 40G ($< 0,2 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$). Hoy día los fabricantes, conscientes de los problemas causados por las asimetrías, han mejorado sus procesos de manufactura hasta conseguir valores de PMD inferiores a $0,1 \text{ ps} / \sqrt{\text{km}}$ [15].

El parámetro que determina la tolerancia a la PMD es el Retardo de Grupo Diferencial (DGD), que representa la diferencia de tiempos de llegada de los dos modos de polarización para una longitud de onda en particular. Para un enlace con un coeficiente de PMD específico, la DGD del enlace es el producto del coeficiente de PMD de la fibra multiplicado por la raíz cuadrada de la longitud ($DGD = PMD \cdot \sqrt{\text{Longitud}}$) El DGD_{max} debería ser menor al 30% del período de un bit de la señal. Dado que la PMD en la fibra es una relación estadística, el DGD_{ave} se especifica para el 10% del período del bit. En la tabla 3.4 se encuentran las distancias máximas alcanzables por un enlace de 10G y 40G en función de la PMD de la fibra [21].

Tabla 3.4. Distancias máximas alcanzables por un enlace de 10G y 40G en función de la PMD de la fibra.

Tasa de transmisión (Gb/s)	Período del bit (ps)	Tolerancia al DGD (ps)	(@0.5ps/km ^{1/2}) Longitud del enlace (km)	(@0.2ps/km ^{1/2}) Longitud del enlace (km)	(@0.1ps/km ^{1/2}) Longitud del enlace (km)
10	100	10	400	2500	15625
40	25	2.5	25	156.25	976

Como puede verse, la PMD de la fibra es una limitante importante en la longitud de los enlaces a 40G. En los sistemas DWDM híbridos con canales de 10G y 40G, una forma de contrarrestar los efectos de la PMD, es usando técnicas de modulación como ODB y DQPSK. Sin embargo, en el diseño de los enlaces, cuando el DGD sobrepasa los niveles de tolerancia, se le aplica una penalización al requerimiento de OSNR. En la tabla 3.5 se observan los valores de penalización utilizados para un BER de 10^{-12} [21]. Esta penalización implica por tanto un requerimiento mayor de la Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR)

Tabla 3.5. Penalización en db al OSNR en función del DGD

10G				40G			
NRZ		DRZ		ODB		DQPSK	
DGD (ps)	Penalty (db)	DGD (ps)	Penalty (db)	DGD (ps)	Penalty (db)	DGD (ps)	Penalty (db)
5 < x < 10	0,5	15 < x < 18	0,5	1,8	1	6	1
10 < x < 15	1,5	18 < x < 20	1,5	1,8 < 2,5	2	6 < 8	2
		20 < x < 22	3				

3.2.3 La eficiencia espectral y la OSNR

Como se ha mencionado, la mayoría los sistemas DWDM actuales operaran con una separación entre canales de 50 GHz, alcanzando una capacidad de 80 canales si se usa sólo la banda C ó L, y hasta 160 canales si se combinan ambas bandas en un mismo sistema. Lo que

quiere decir que la eficiencia espectral para un enlace de 10G es de 0,2 bits / Hz, y de 0,8 bits / Hz para una señal de 40G. Cuando se transmite a 40G de la misma forma que 10G, utilizando modulación OOK, el ancho espectral de la señal sería cuatro veces mayor que con 10G; o sea, a 40G solo hay un cuarto de energía por bit disponible comparada con una señal de 10G (suponiendo que la potencia global de ambas señales es constante), lo que significaría que la señal recogería 4 veces más ruido de los amplificadores ópticos.

Otra forma de verlo es que a 40G sólo hay un cuarto de energía por bit disponible que en 10G, suponiendo que la potencia global de ambas señales es constante. Esto significa que a 40G la señal necesita cuatro veces (6dB) más para sostener la misma OSNR. La obligación de mantener la separación entre canales ópticos en 50 GHz impulsa a la elección de un formato de modulación más eficiente en el uso del espectro, que el OOK usado actualmente en 10G, como ODB y DQPSK. La figura 3.3 muestra el esquema de funcionamiento de un sistema DWDM híbrido con canales (lambdas) de 10G y 40G.

Debido a que las señales de 40G tienen un requerimiento mayor de OSNR y la de tolerancia a la dispersión residual es menor que las señales de 10G, es necesario utilizar otros esquemas de modulación como ODB o DQPSK, así como Compensadores de Dispersión Cromática Sintonizables (TDCM), cuando estas señales viajan juntas por el mismo sistema.

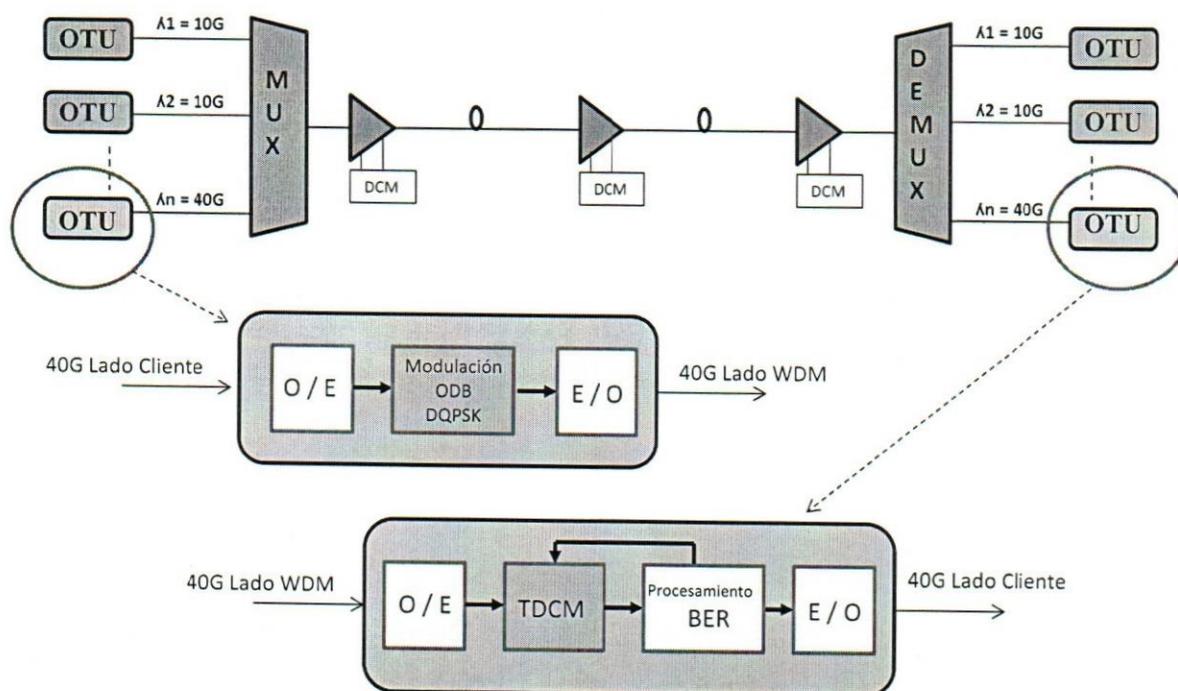


Figura 3.3. Sistema DWDM híbrido con canales de 10G y 40G

El ancho espectral máximo de una señal modulada en DQPSK es de aproximadamente 1 nm (en el punto de -20 db), lo que hace que ofrezca una mayor tolerancia a la PDM y a los efectos no lineales. En el caso de la modulación ODB, su espectro es inferior a 0,6 nm (a -20 db) por lo que su impacto es relativamente pequeño cuando las señales de 10G se envían conjuntamente con señales de 40G, pero su tolerancia a la PMD es baja. En capítulo IV se encuentra un grupo de imágenes tomadas en el laboratorio con un Analizador de Espectro Óptico (OSA), en la que se puede apreciar el ancho espectral, así como el espaciamiento de canal en un sistema DWDM híbrido con señales de 10G y 40G y distintos esquemas de modulación. En ellas se puede notar que cuando se transmiten dos canales contiguos 10G-NRZ el espaciamiento puede ser de 100 GHz, pero con señales 40G-DQPSK o 10G-DRZ se deberá mantener un espaciamiento mínimo entre ellas de 200 GHz para que no exista solapamiento.

3.2.4 Los efectos no lineales

La intensidad con que se producen los efectos no lineales en la fibra está relacionada con la potencia óptica aplicada a la misma, el ancho espectral, las propiedades del formato de modulación, el coeficiente de dispersión de la fibra y el número de tramos (*spans*) del enlace. En general, las señales ópticas de 40G presentan una menor tolerancia a los efectos no lineales comparados con las de 10G, ya que requieren de un mayor nivel de potencia para mantener el mismo OSNR. En este sentido es necesario el uso de técnicas y formatos de modulación, tales como la modulación de fase y retorno a cero (RZ), que permiten aumentar la tolerancia a los efectos no lineales sin un aumento significativo en la potencia de transmisión. Por otra parte se debe mantener el nivel de potencia nominal a la entrada de los amplificadores ópticos dentro de los límites recomendados. En la tabla 3.6 se indican los valores de potencia nominal (para una λ), recomendados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones en función del tipo de fibra para un enlace de 40G [14].

Tabla 3.6. Valores de potencia nominal a la entrada un amplificador óptico que tiene una potencia máxima de salida de 20 dbm, en función del tipo de fibra, para un enlace de 40G.

Esquema de modulación	Cantidad de canales	G.652 (dBm)	G.655 (dBm)	G.653 (dBm)
ODB	40 λ	4	4	/
	80 λ	1	1	/
DQPSK	40 λ	4	2	-5
	80 λ	1	1	-5

λ : Longitud de onda (canal óptico)

Durante el diseño de sistemas DWDM híbridos, donde se transmitan señales de 10G conjuntamente con señales de 40G, se debe mantener un espaciamiento de 200 GHz cuando se utilizan fibras G.652 y de 400 GHz sobre fibras G.655 [14]. En el caso específico de sistemas DWDM sobre fibras G.653, en las que el punto de cero dispersión cromática cero ha sido desplazado a la ventana de 1550 nm, se debe considerar un mayor espaciamiento entre canales

ópticos para evitar la diafonía originada por la XPM y la FWM. Por otro lado no es recomendable utilizar modulación ODB sobre este tipo de fibra debido a su baja tolerancia a los efectos no lineales, producto del bajo nivel de dispersión cromática en la ventana de 1.550 nm [14].

Es importante tomar en cuenta que en los enlaces de larga distancia donde la potencia óptica de cada canal es diferente, los efectos no lineales aumentan en aquellos canales en los cuales la potencia óptica es excesivamente alta y el OSNR disminuye en los canales en los que la potencia óptica es excesivamente baja. En este caso, debe llevarse un proceso de equalización para cada canal. Cuando hay cuatro o menos tramos en un sistema, se debe igualar la potencia óptica de cada longitud de onda en el extremo de transmisión y asegúrese de que la diferencia no sea mayor de 1 dB. Cuando el número de tramos es mayor a cuatro, se debe igualar la potencia de cada longitud de onda en el extremo de transmisión y asegurar la equalización aumentando o disminuyendo la potencia de cada canal en un valor igual a la mitad de la diferencia entre la potencia más alta y la más baja [14].

Como hemos visto, el incremento de la capacidad, fundamentado en el aumento de la tasa de transmisión de 10G a 40G, bajo la premisa no instalar nuevos cables de fibra, así como no realizar mayores cambios en los sistemas DWDM actuales, implica el uso de otras técnicas de modulación y codificación, así como Compensadores de Dispersión Sintonizables, que ofrezcan una mayor tolerancia a los factores de restricción originados por los fenómenos intrínsecos de la fibra cuando se transmiten señales ópticas a estas velocidades. Adicionalmente es necesario hacer una caracterización de la fibra instalada, sobre todo en aquellos enlaces con distintos tipos de fibra (G.652, G.653 y G.655) que permita determinar con precisión el valor del DGD y el impacto de los efectos no lineales (XPM y FWM) en cada uno de los tramos, y escoger la mejor solución tecnológica al momento de realizar la migración a sistemas de 40G.

3.3 Hacia los 100G

La creciente demanda para aumentar el ancho de banda las redes de transporte ópticas, lleva a la aparición de nuevas jerarquías de transmisión más allá de la base actualmente instalada, que se compone principalmente de canales DWDM con longitudes de onda de 2.5G, 10G y la reciente jerarquía de 40G. Existe una gran presión para investigar nuevas tecnologías de transporte y desarrollar la próxima generación de sistemas ópticos que transporten datos en un canal de 100G, incluso para las redes del futuro de 400G.

Actualmente hay tres organismos trabajando conjuntamente en la definición de estándares para el desarrollo de las interfaces de los puertos cuando se transmite a 100G. La IEEE (802.3ba) define las normas para los puertos del lado cliente (100GbE); la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-T G.709) proporciona los protocolos de encapsulamiento, mapeo y multiplexación del lado WDM (OTN), y la OIF (*Optical Internetworking Fórum*) se encarga de definir los acuerdos de interconexión para enlaces DWDM de larga distancia en el desarrollo de interfaces eléctricas y ópticas, técnicas de modulación, formato de corrección de errores, etc. (Ver figura 3.4) [28]



Figura 3.4. Definición de Estándares para el transporte de una señal de 100G

Cuando las señales de 100GbE se transmiten a través de una red OTN (*Optical Transport Network*), pueden o bien ser mapeados en OTU4 o inversamente multiplexados en OTU2 u OTU3. En el Anexo se encuentra un resumen de la recomendación ITU-T G.709/Y.1331 referente a las interfaces, mapeo y multiplexación en OTN [23].

Hay varias rutas de encapsulación y mapeo en función de las modalidades de aplicación de los puertos 100GbE. La tecnología de encapsulación directa asigna las señales de servicios 100GbE en ODU4/OTU4 (112 Gbps) sobre una sola longitud de onda. Por su parte, la técnica de multiplexación inversa permite la transmisión a 100G sobre redes de 10G o 40G (ODU2-11v u ODU3-3v). La ITU-T (*Study Group 15 Question 11*) ha estandarizado las dos rutas de encapsulación y mapeo, ya que pueden ser implementadas utilizando el método de asignación del Protocolo GMP (*General Mapping Protocol*) [14]. En la figura 3.5 se muestran las distintas formas de encapsulación y mapeo para señales de 100GbE estandarizados por la ITU-T [28].

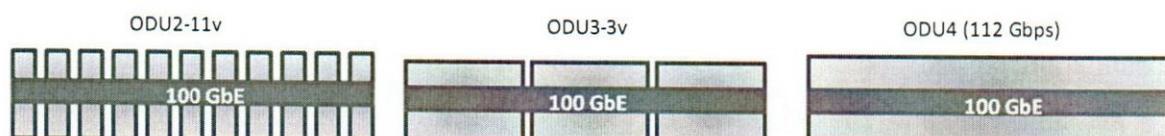


Figura 3.5. Rutas de encapsulación y mapeo para 100GbE – ITU-T SG 15 – G.709 OTN

Al igual que en la migración de los enlaces de 10G a 40G, sigue siendo un requisito de los operadores de redes de telecomunicaciones, no realizar cambios en la red de fibra instalada y mantener el espaciado de canal en 50 GHz en los sistemas DWDM existentes cuando se desea aumentar la velocidad de transmisión a 100G [19]. En este caso los factores de restricción, producto de los fenómenos de la fibra, ven multiplicados sus efectos diez veces con relación a los sistemas actuales de 10G. Las técnicas utilizadas para compensar estos efectos en los enlaces de 40G no son suficientes, lo que obliga a pensar en otras tecnologías que aumenten la tolerancia a estos factores cuando se transmite a 100G.

3.3.1 Factores de restricción para la transmisión a 100G y técnicas utilizadas para contrarrestar los mismos.

Como se ha visto, la tolerancia a la dispersión cromática es inversamente proporcional a su anchura espectral y directamente proporcional al ancho del pulso. Para una señal NRZ 40G–OOK la tolerancia a la CD es de aproximadamente 60 ps/nm. Este valor es tan bajo que

se debe utilizar un módulo de compensación de dispersión sintonizable (TDCM) con rango de sintonización de un centenar de ps/nm en el lado receptor, para ajustar la CD residual al nivel de tolerancia para una señal de 40G. En el caso de una señal NRZ-100G OOK, la tolerancia a la CD puede llegar a ser de 10 ps/nm, este valor está fuera del límite de ajuste de precisión del TDCM, lo que significa que el TDCM no es aplicable para un enlace de 100G y se hace necesario recurrir a otras técnicas de compensación para la CD. De igual manera, la tolerancia a la PMD se incrementa linealmente con el ancho del pulso. Para una señal de 100G (NRZ-OOK 112 Gbps) la tolerancia a la PMD es de 1 ps, este valor es inferior al presupuesto de ingeniería de un enlace de 1200 km (2,4 ps) [14].

Por otro lado, el ancho de banda eléctrico en un fotodetector se incrementa linealmente con la tasa de baudios de la señal óptica, esto introduce un mayor nivel de ruido en el circuito de decisión del receptor óptico, conduciendo a un incremento del BER y en consecuencia un mayor Requerimiento de la Relación Señal a Ruido Óptica (ROSNR). En general, si la velocidad de transmisión se cuadruplica, en teoría el ROSNR aumenta 6 db [14]. Por ejemplo, el ROSNR para una señal de 42,8 Gbps RZ-DQPSK es aproximadamente 12,5 db. Considerando un 7% de *overhead*, la tasa real de una señal de 100G llega a ser 112 Gbps; el ROSNR para esta velocidad es de 16,7 db que es difícil de lograr en una aplicación comercial 100G sobre una distancia de transmisión de 1.200 km, debido a la cantidad de ruido ASE introducido por los amplificadores ópticos EDFA a lo largo del enlace.[14].

Para generar y detectar una señal NRZ-OOK 112 Gbps, se requiere un ancho de banda en los moduladores y receptores ópticos (MZM, PIN, etc.), y otros dispositivos fotoeléctricos de aproximadamente 70 GHz. Esto, sin embargo, es difícil de lograr mediante el uso de los dispositivos fotoeléctricos actuales; aparte de su alto costo. Además, si se utiliza una velocidad de banda base de 112 Gbps, el espectro óptico de una señal óptica de 100G va a ser muy amplio, por lo que es imposible de lograr manteniendo la separación entre canales de 50 GHz en los sistemas DWDM actuales; así como tolerar la penalización causada por el efecto de filtraje de los dispositivos ROADM en cascada [19].

En resumen, es imposible con las técnicas tradicionales de modulación de intensidad, cumplir con una velocidad de transmisión a 100G y el requisito de espaciado de canal de

50 GHz al mismo tiempo. En lugar de ello, el sistema debe emplear tecnologías de multiplexación más avanzadas, que permitan reducir la velocidad de transmisión mientras se mantiene la tasa de bits sin hacer cambios en la línea óptica, asegurando que la anchura espectral sea menor a 50 GHz, incluso cuando la tasa de transmisión es de 100G. Estas tecnologías incluyen la modulación por desplazamiento de fase y cuadratura, y la modulación por polarización dual (DP-QPSK) explicadas en el capítulo I.

La tecnología DP-QPSK resuelve principalmente los problemas fotoeléctricos de los sistemas de transmisión a 100G. Sin embargo, todavía se deben mitigar los problemas de baja tolerancia a la CD y PMD. Además, los sistemas de transmisión de 100G tienen un requisito mayor de OSNR si se utilizan receptores ópticos tradicionales de detección directa, específicos para sistemas de transmisión de 10G y 40G.

Como se ha visto, los sistemas DWDM suelen utilizar Módulos de Compensación de Dispersión (DCM) para compensar la dispersión cromática en la línea. También utilizan DCMs sintonizables (TDCMs) en el extremo de recepción para limitar la dispersión residual a un nivel tolerable para el formato de transmisión utilizado. Estas medidas, sin embargo, a menudo limitan el diseño y construcción de la red, y en especial hacen difícil la implementación del *grooming* de los servicios en una red ROADM. Por otra parte, los métodos de compensación óptica para la PMD no han alcanzado la madurez suficiente, además de que necesitan de un mantenimiento constante, y a largo plazo tienen una alta probabilidad de falla [15].

A pesar de la modulación DP-QPSK, los efectos causados por la CD y PMD pueden dar lugar a una distorsión lineal no deseada en la fase y/o polarizaciones de la señal óptica. Sin embargo, a través un método para detectar el campo eléctrico de una señal óptica, se puede utilizar la ecualización lineal (ajuste por igualación de la fase y polarización) y así compensar los efectos causados por la CD y la PMD. Para medir el campo eléctrico en las dos polarizaciones de la señal óptica, se utiliza la técnica de detección coherente descrita en el capítulo I, la cual además de obtener simultáneamente la información acerca de la polarización, la amplitud y la fase del dominio óptico, ofrece una mayor sensibilidad de OSNR

de la que se obtiene con un sistema de detección directa. Esta característica contribuye significativamente a ampliar la distancia de un sistema de transmisión de 100G.

Una vez que el receptor obtiene la información de polarización, amplitud y fase de la señal óptica, efectúa el Procesamiento de la Señal Digital (DSP) para calcular y compensar las degradaciones causadas por la CD y la PMD en el campo óptico. Debido a que estos efectos son lineales, se utiliza un filtro para eliminar la distorsión y la ISI causada por la CD y la PMD, y finalmente restaurar los elementos del símbolo original. Este proceso de ecualización de la dispersión es la principal función de la tecnología DSP y se lleva a cabo a nivel eléctrico después de que se realiza la fotodetección. En general, la ecualización para compensar la CD se realiza en el dominio de la frecuencia, y para compensar la PMD se realiza en el dominio del tiempo.

Al utilizar la tecnología DSP para compensar los efectos causados por la dispersión cromática y la PMD en el dominio eléctrico, un sistema de transmisión de 100G puede tolerar una CD de hasta 40.000 ps/nm y 74 ps de retardo de grupo diferencial (DGD). En este caso, los DCMs ya no necesitan que ser instalados en la línea de transmisión y el efecto de la PMD ya no es un factor que limita la longitud del enlace. En la actualidad, la modulación DP-QPSK, la detección coherente, y el DSP se utilizan juntos en un sistema, y la combinación de estas tecnologías se ha convertido en el esquema de configuración más utilizado por los proveedores de equipos de sistemas de transmisión de 100G [19].

Si bien es cierto que el cambio de modulación de NRZ-OOK a DP-QPSK reduce la tasa de de símbolo cuatro veces (112 Gbps a 28 Gbaud), el número de componentes foto-electrónicos se incrementa por un factor de cuatro o más. A pesar de este incremento, hoy día los sistemas de 100G tienden a ser costo-competitivamente mejor que los sistemas de 10x10G. Esto se debe a que los fabricantes de equipos de telecomunicaciones se han dado a la tarea de combinar múltiples funciones en un solo *chip*, reduciendo de esta forma el número de componentes, lo cual no sólo disminuye la inversión inicial (*capex*), sino que además reduce el consumo de potencia, e incrementa la confiabilidad del sistema al reducir el número de posibles puntos de falla [22].

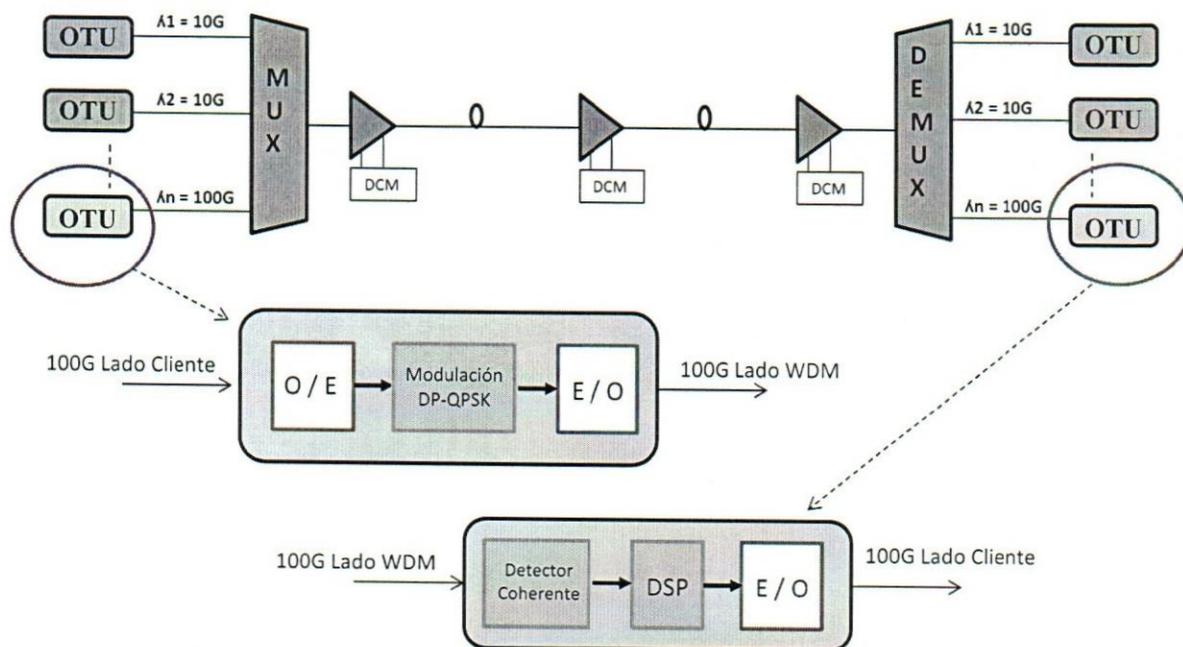


Figura 3.6. Sistema DWDM híbrido con canales de 10G y 100G

En resumen, la transmisión de señales a 100G, utilizando la tecnología de modulación DP-QPSK, la detección coherente y el DSP, ofrece a los operadores de redes de telecomunicaciones múltiples beneficios técnicos que le permiten reducir los factores de restricción originados por la CD y PMD, alcanzando así mayores distancias sin regeneración, aumentar la eficiencia espectral y disminuir los costos operativos y de inversión, comparado con las técnicas tradicionales de modulación de intensidad (OOK) y los receptores de detección directa, utilizados comúnmente en los sistemas de 10G y 40G. Esta alternativa se presenta como una solución al problema de los operadores que poseen redes DWDM sobre distintos tipos de fibra, con altos valores de CD y PMD, y baja tolerancia a los efectos no lineales, los cuales son difíciles de mitigar a 40G y 100G, utilizando los métodos tradicionales de modulación de intensidad y detección directa.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de las mediciones de ancho espectral y espaciamiento de canal, en una simulación de un sistema DWDM híbrido con canales de 10G/40G y distintos esquemas de modulación.

4.1 Objetivo de la prueba

El objetivo de esta prueba es medir con un Analizador de Espectro Óptico (OSA), el ancho espectral de cada una de las señales ópticas y determinar cuál es el espaciamiento mínimo permisible cuando se mezclan señales de 10G y 40G en un sistema DWDM híbrido. Las unidades Transponedoras Ópticas (OTU) de 10G y 40G utilizadas en esta simulación son de frecuencia sintonizable, lo que permite variar el valor de la longitud de onda en cada prueba.

Es importante destacar que las pruebas sobre sistemas de 100G no pudieron ser realizadas ya que hasta el momento no se cuenta en el laboratorio con Unidades Transponedoras (OTUs) de 100G.

4.2 Configuración del equipamiento utilizado

Con el fin de verificar la posibilidad de transmitir simultáneamente canales de 10G y 40G en un sistema híbrido DWDM, se realizó una simulación en el laboratorio de equipos de transmisión del Centro de Entrenamiento de *Huawei Technologies* bajo la configuración que se muestra en la figura 4.1.

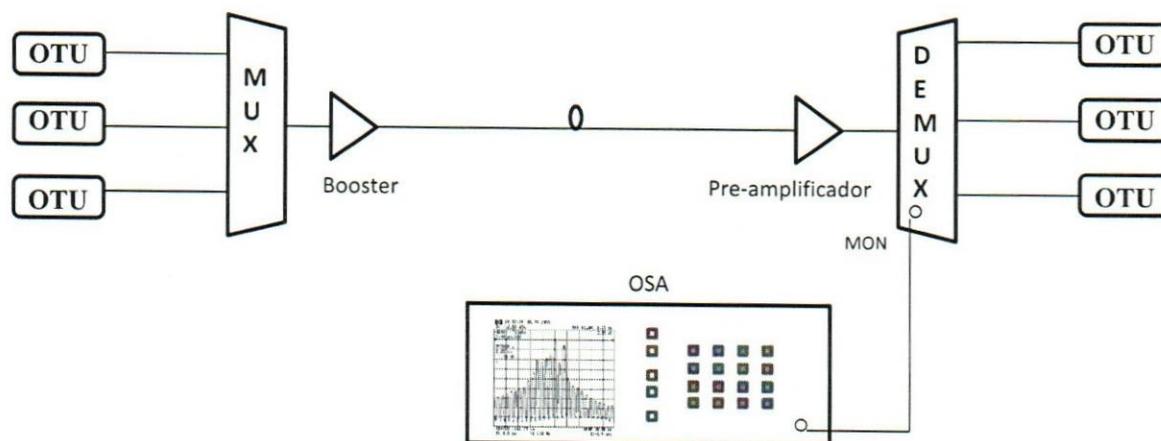


Figura 4.1. Esquema de la configuración utilizada en el laboratorio

Para la realización de esta configuración se dispuso del siguiente equipamiento:

Dos (2) sub-bastidores OSN 6800 de la línea Optix DWDM de Huawei Technologies, como el mostrado en la Figura 4.2, con las siguientes unidades:

- Una Unidad Trasponedor Óptica (TMX) de 10G con modulación NRZ
- Una Unidad Trasponedor Óptica (LSX) de 10G con modulación DRZ
- Dos (2) Unidades Tansponedor Óptica (NS2) de 40G con modulación DQPSK
- Un Multiplexor DWDM de 40 canales (M40) con espaciamiento de canal de 100 GHz
- Un Amplificador Booster (OBU1)
- Un Pre-amplificador (OAU1)
- Un Atenuador variable de cuatro puertos (VA4)

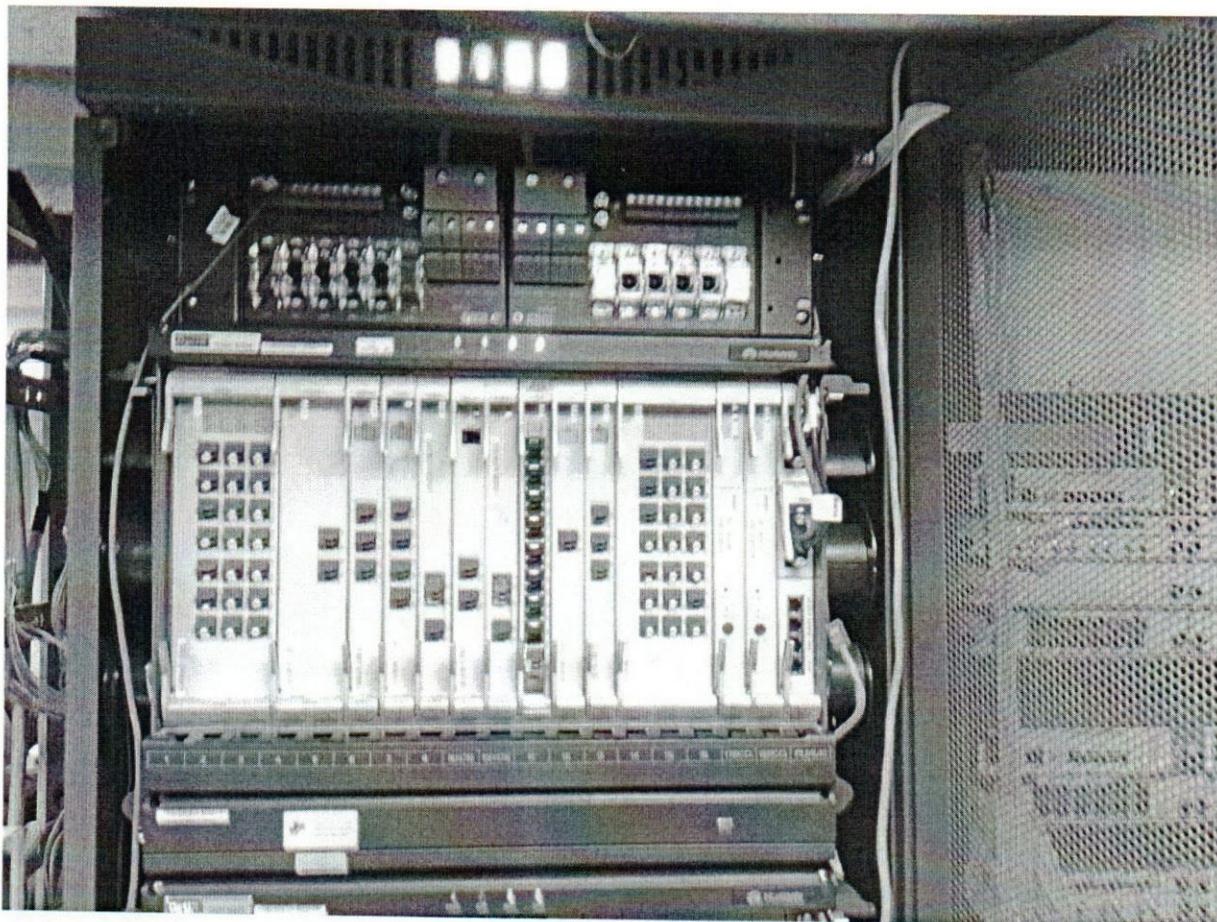


Figura 4.2. Equipo DWDM Optix OSN 6800 – *Huawei Technologies*

Un Analizador de Espectro Óptico (OSA) AQ6370B YOKOGAWA (600 ~ 17000 nm) mostrado en la Figura 4.3.

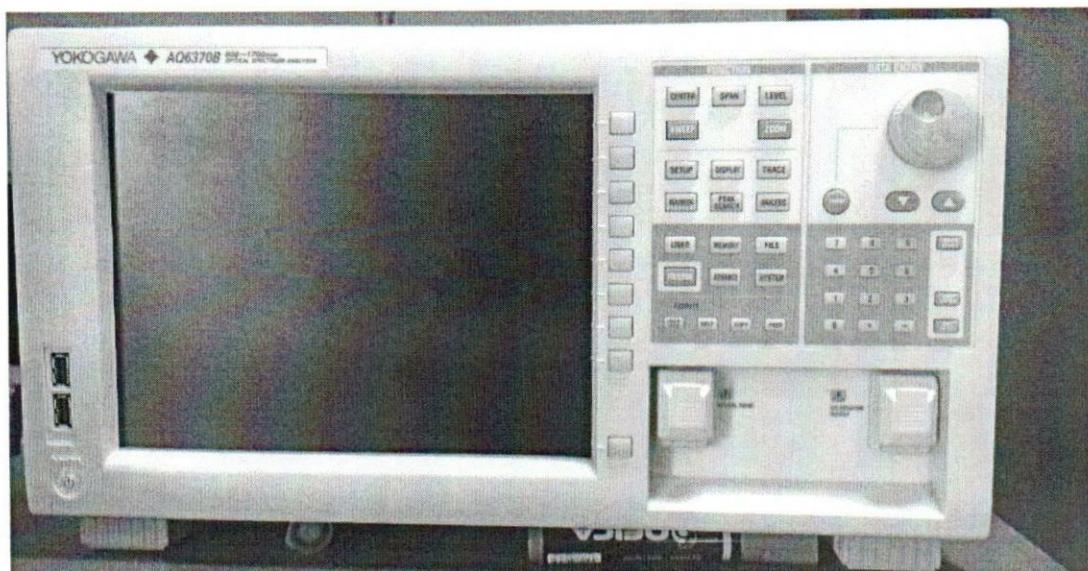


Figura 4.3. Analizador de Espectro Óptico (OSA) AQ6370B – YOKOGAWA

4.3 Procedimiento

Inicialmente se alimentó en Multiplexor DWDM con las señales de 10G y 40G por separado con el fin de medir el ancho espectral de cada una en el punto de -20 dbm.

Posteriormente se simuló un sistema DWDM híbrido combinando señales de 10G y 40G con distintos esquemas de modulación, variando la longitud de onda de cada una y su ubicación en el espectro, con el fin de determinar la separación mínima entre ellas, así como la mejor combinación entre señales de 10G y 40G, sin que se produzca solapamiento entre ellas.

Los resultados se muestran a en las figuras 4.4 a 4.11

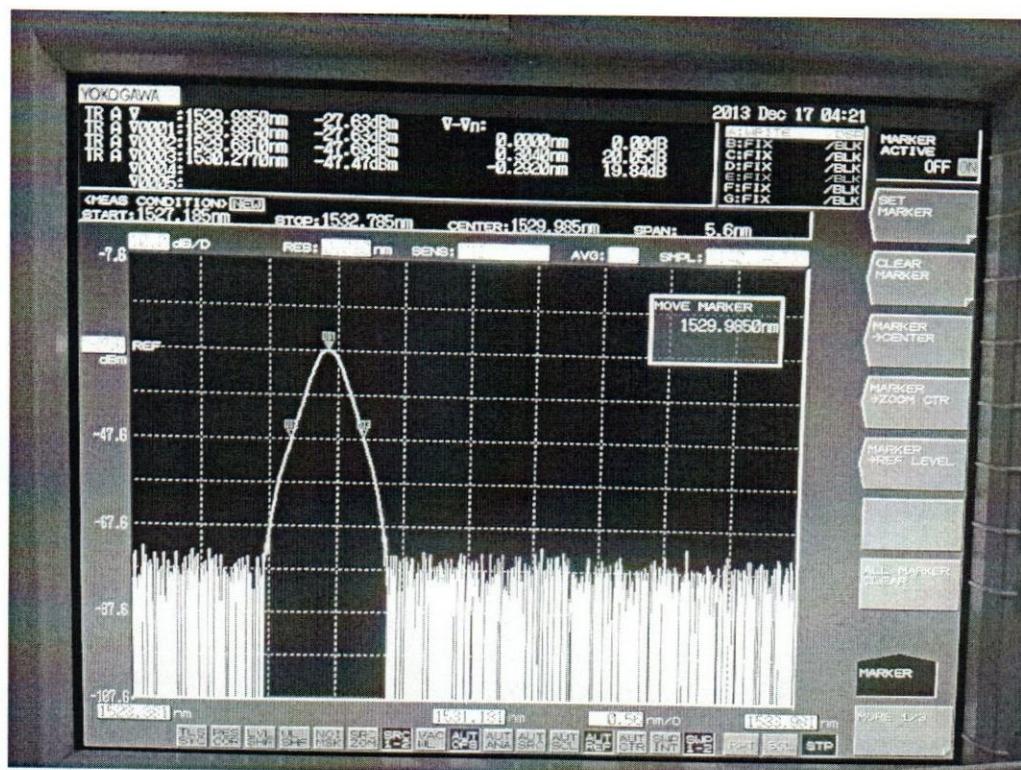


Figura 4.6. Diagrama espectral de una señal de 40G con modulación DQPSK

Ancho espectral (ΔB) en el punto de -20 db:

$$\Delta B \text{ (nm)} = [1.530,297 \text{ nm} - 1.529,681 \text{ nm}] = 0,596 \text{ nm}$$

$$\Delta B \text{ (GHz)} = [195.905 \text{ GHz} - 195.984 \text{ GHz}] = 79 \text{ GHz}$$

El ancho espectral medido es superior a 50 GHz, por lo que debe usarse en un sistema DWDM con un espaciamiento mínimo entre canales de 100 GHz (40λ)

4.3.2 Simulación de un sistema híbrido DWDM de 10G y 40G

A continuación se simuló un sistema híbrido DWDM con lambdas de 10G y 40G variando la frecuencia, ubicación y separación entre canales. Los resultados se muestran en las figuras 4.7; 4.8; 4.9; 4.10 y 4.11.

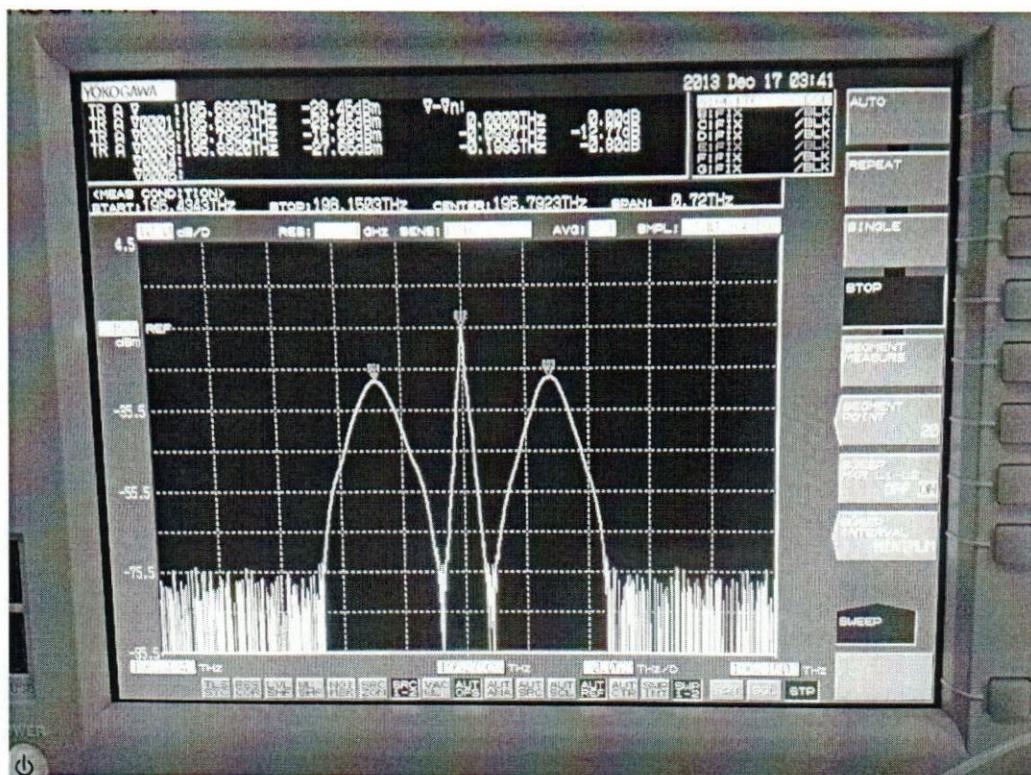


Figura 4.7. Diagrama espectral a la salida del multiplexor DWDM compuesta de una señal de 10G con modulación NRZ entre dos señales de 40G con modulación DQPSK y un espaciamiento entre ellas de 100 GHz

Señal 1 de 40G DQPSK - Frecuencia central: 195,700 THz

Señal de 10G NRZ – Frecuencia central: 195,800 THz

Señal 2 de 40G DQPSK – Frecuencia central: 195,900 THz

No existe solapamiento, por lo que admite una separación entre canales de 100 GHz

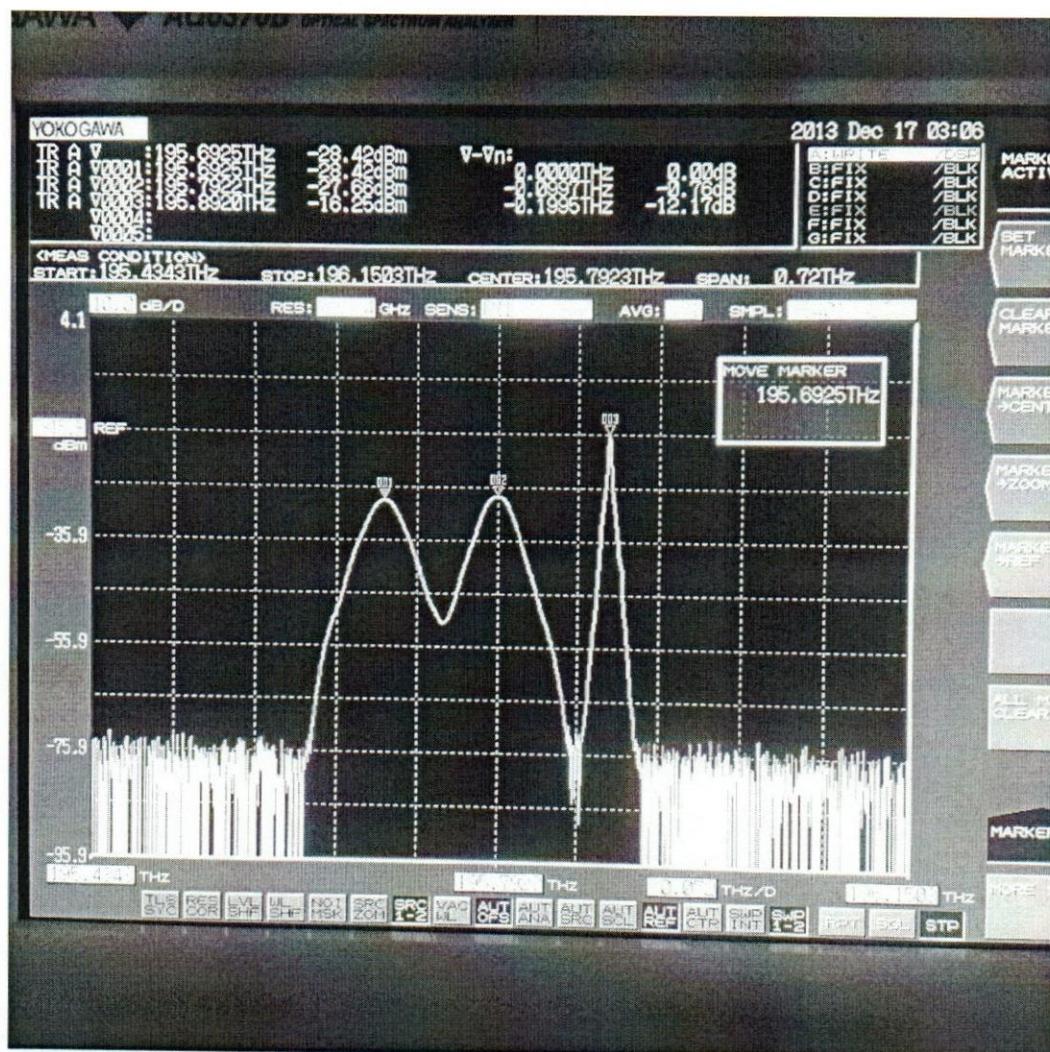


Figura 4.8. Diagrama espectral a la salida del multiplexor DWDM compuesta de una señal de 10G con modulación NRZ al lado de dos señales de 40G con modulación DQPSK y un espaciado entre ellas de 100 GHz

Señal 1 de 40G DQPSK - Frecuencia central: 195,700 THz

Señal 2 de 40G DQPSK – Frecuencia central: 195,800 THz

Señal de 10G NRZ – Frecuencia central: 195,900 THz

Se produce un solapamiento entre al colocar dos canales de 40G con una separación entre ellos de 100G. Esto ocasiona ruido en las eñal producto de la interferencia entre canales.

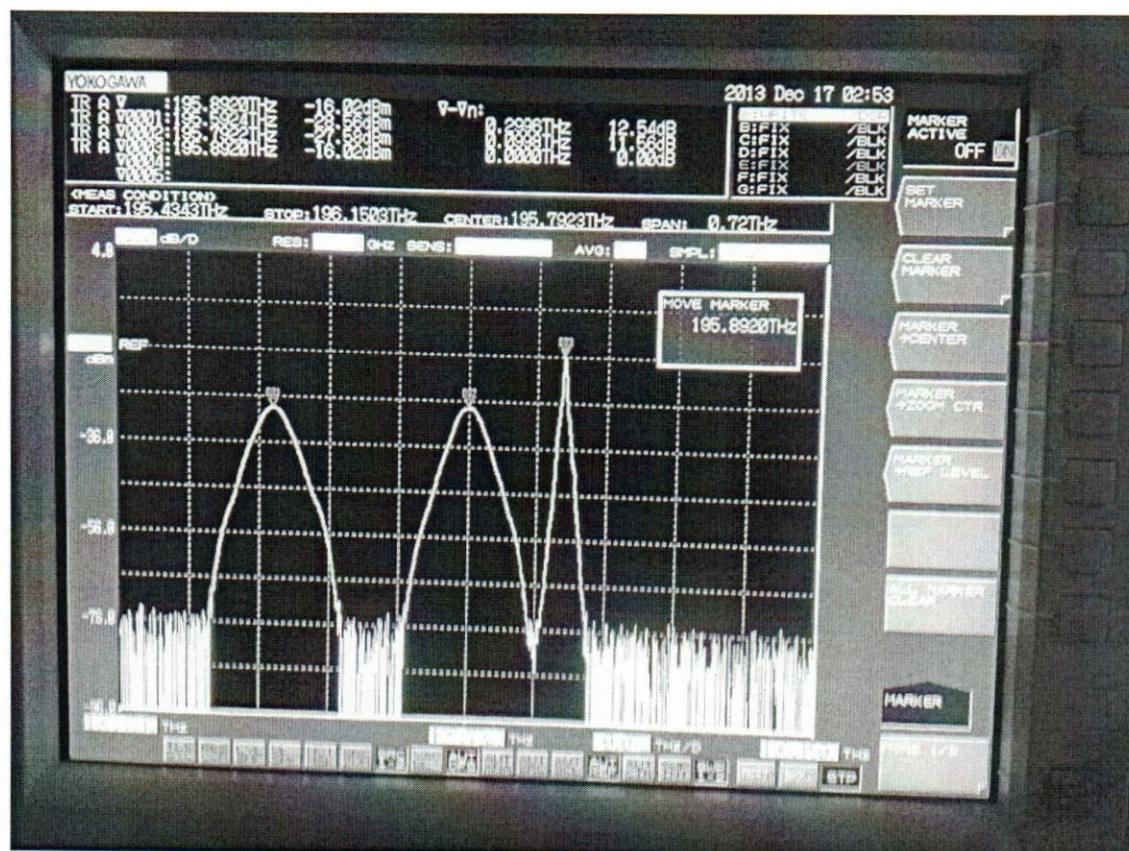


Figura 4.9. Diagrama espectral a la salida del multiplexor DWDM compuesta de una señal de 10G con modulación NRZ al lado (a 100 GHz) de dos señales de 40G con modulación DQPSK y un espaciamiento de 200 GHz entre ellas

Señal 1 de 40G DQPSK - Frecuencia central: 195,600 THz

Señal 2 de 40G DQPSK – Frecuencia central: 195,800 THz

Señal de 10G NRZ – Frecuencia central: 195,900 THz

Al colocar dos canales de 40G se requiere una separación mínima entre ellos de 200 GHZ para que no exista solapamiento

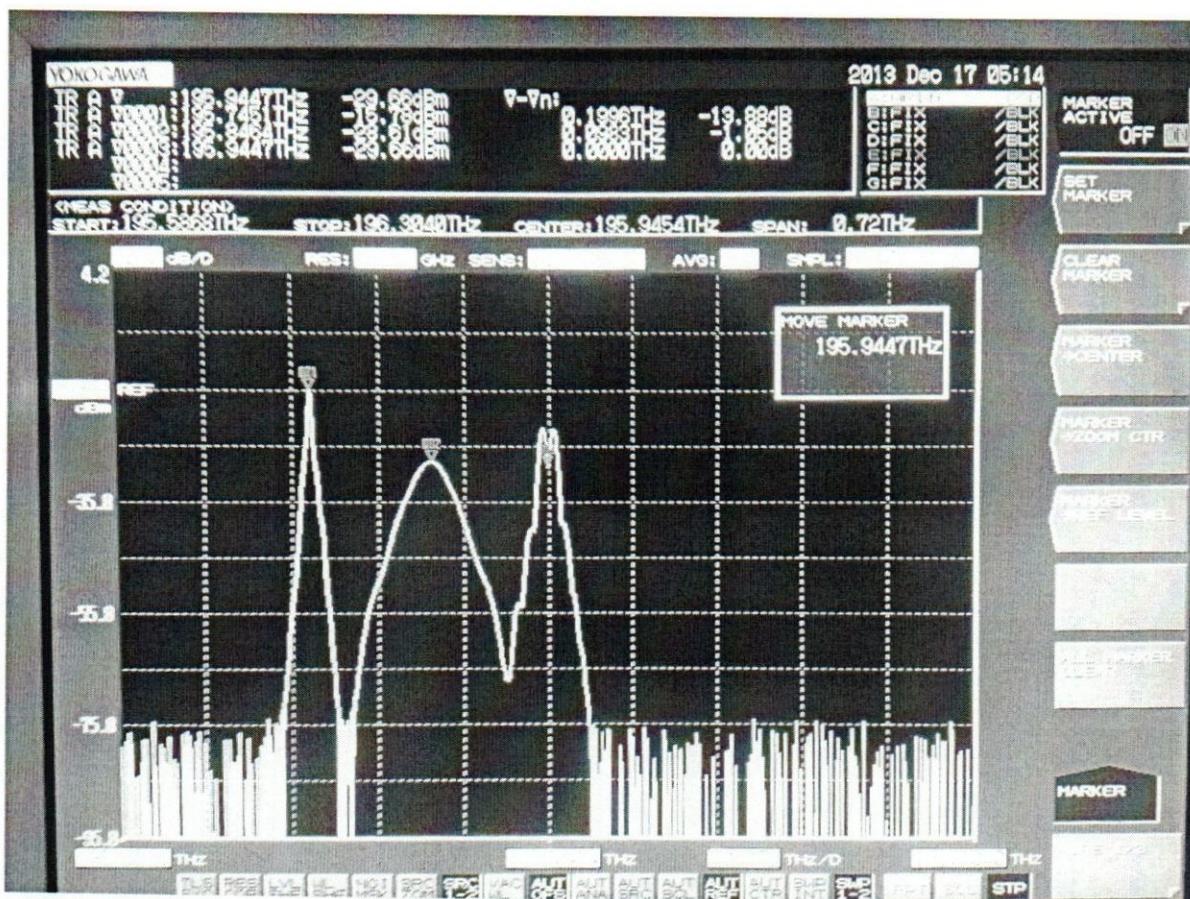


Figura 4.10. Diagrama espectral a la salida del multiplexor DWDM compuesta de una señal de 10G NRZ al lado de una señal de 40G DQPSK y una señal de 10G con modulación DRZ, todas con separación de 100GHz,

Señal de 10G NRZ - Frecuencia central: 195,700 THz

Señal de 40G DQPSK – Frecuencia central: 195,800 THz

Señal de 10G DRZ – Frecuencia central: 195,900 THz

La señal de 10G DRZ requiere una separación mayor a 100 GHz cuando se coloca al lado de una señal de 40G DQPSK, tal como se aprecia en la figura 4.11.

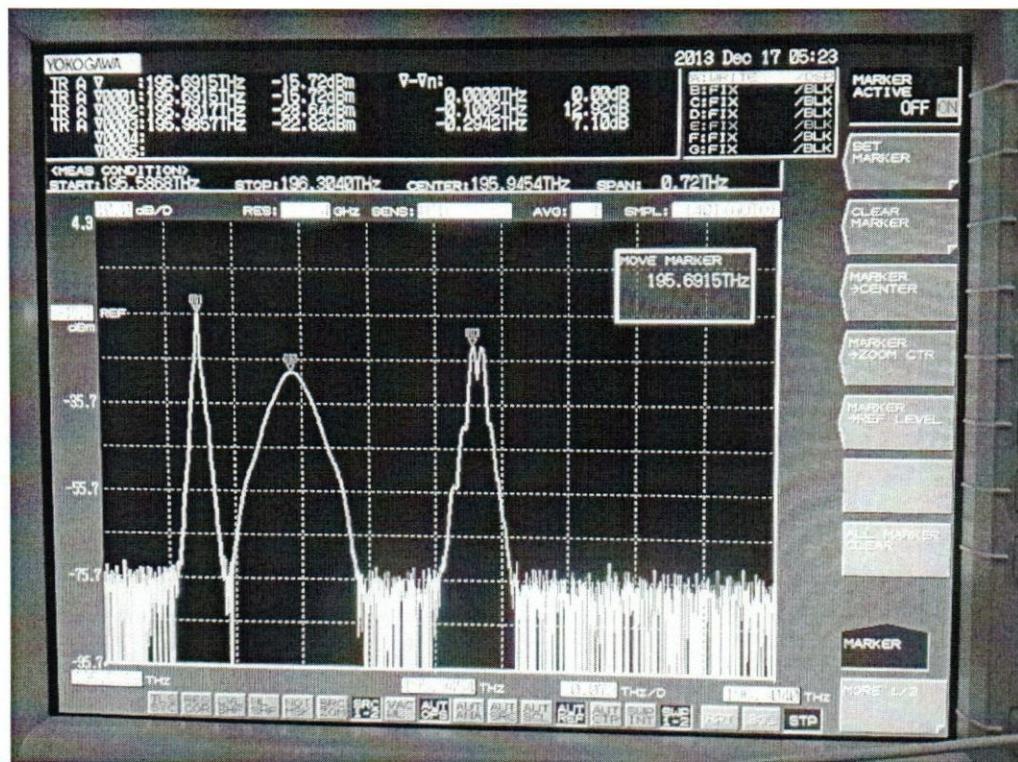


Figura 4.11. Diagrama espectral a la salida del multiplexor DWDM compuesta de una señal de 10G NRZ al lado de una señal de 40G DQPSK con espaciamiento de 100 GHz, y una señal de 10G DRZ con separación de 200GHz

Señal de 10G NRZ - Frecuencia central: 195,700 THz

Señal de 40G DQPSK – Frecuencia central: 195,800 THz

Señal de 10G DRZ – Frecuencia central: 196,000 THz

4.4 Análisis de los resultados obtenidos

Del resultado obtenido de estas pruebas de laboratorio, se puede concluir lo siguiente:

Como puede apreciarse las señales de 40G tienen un espectro mayor a las señales de 10G. Las unidades transpondedoras utilizadas de 40G con modulación DQPSK, presentan un ancho espectral de 79 GHz. Esto significa que estas unidades pueden trabajar en sistemas DWDM con un espaciamiento entre canales mayor a 100 GHz, lo que limita su capacidad a 40 canales (longitudes de onda) de acuerdo con la grilla de distribución de frecuencias de la banda C o L, de la recomendación ITU-T G.694.1 [4]

Con el fin de optimizar el uso del espectro en los sistemas DWDM híbridos, donde se dispongan de unidades transpondedoras de 10G con modulación NRZ, éstas deberían ubicarse en medio de dos unidades de 10G con modulación DRZ, o dos de 40G con modulación DQPSK, o una combinación de ambas; esto permitiría mantener un espaciamiento mínimo entre canales de 100 GHz, lo cual ofrecería una mayor capacidad del sistema.

Deberá evitarse en lo posible ubicar dos canales adyacentes de 40G con modulación DQPSK, ó un canal de 40G con modulación DQPSK adyacente a un canal de 10G con modulación DRZ. En caso de hacerlo, deberá mantenerse una separación mínima entre ellos de 200 GHz, de lo contrario se producirá un solapamiento de las señales de ambos canales, ocasionando interferencia.

Es importante destacar que estos resultados de laboratorio sólo muestran la separación mínima que debe mantenerse entre dos canales adyacentes a la salida del multiplexor DWDM, en función de la velocidad de transmisión y el modo de modulación. No considera los efectos

adicionales introducidos por la fibra (CD, PMD, XPM, FWM) analizados en el capítulo 3, los cuales dependen la longitud del enlace y el tipo de fibra utilizada.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se estudió la factibilidad para la migración de los sistemas DWDM que actualmente operan a 2.5 y 10 Gbps a sistemas de 40 y 100 Gbps, considerando las limitaciones de transmisión sobre fibras ITU-T G.652, ITU-G.653 e ITU-T G.655.

El incremento de la capacidad de las redes ópticas de transmisión, fundamentado en el aumento de la tasa de transmisión (de 10G a 40G y 100G), bajo la premisa no instalar nuevos cables de fibra, así como no realizar mayores cambios en los sistemas DWDM actuales, implica el uso de otras técnicas de modulación y codificación, así como receptores de detección coherente, que ofrezcan una mayor tolerancia a los factores de restricción originados por los fenómenos intrínsecos de la fibra cuando se transmiten señales ópticas a estas velocidades.

En aquellos sistemas DWDM de 10G que todavía cuenten con suficientes canales disponibles y la demanda de tráfico a mediano plazo no amerite una ampliación significativa, deberían utilizarse OTUs de multiplexación inversa para el transporte de señales de 40GbE, STM-64 y 100GbE, con el fin de no realizar ningún tipo de modificación en la red actual, manteniendo los mismos DCMs y amplificadores ópticos instalados.

En los sistemas DWDM híbridos donde se transmiten señales de 10G/40G/100G, se deberá mantener el mayor espaciamiento posible entre canales. Este espaciamiento será mayor en fibras con menor coeficiente de dispersión cromática debido a su baja tolerancia a los

efectos no lineales. También se deberá considerar el ancho espectral de la señal dependiendo del esquema de modulación, con el fin de evitar el solapamiento entre canales adyacentes.

Una forma de mitigar el problema de la baja disponibilidad de canales DWDM en las fibras G.653 es haciendo uso de *Muxponders*, que son unidades transpondedoras (OTUs) con capacidad de multiplexar varias señales de baja velocidad y mapearlas sobre una sola longitud de onda de alta velocidad. En este sentido se podrían migrar los sistemas que actualmente operan a 10G, a sistemas de 40G y 100G, aumentando de esta manera la eficiencia espectral en cada uno de los canales y por ende incrementando la disponibilidad del sistema.

En aquellos sistemas DWDM donde la dispersión cromática residual esté fuera del límite de compensación de un TDCM a 40G, o que el valor de PMD sea tan alto que el DGD esté fuera de los límites de tolerancia para un enlace de 40G, la migración directa de 10G a 100G podría ser una opción; ya que las tecnologías utilizadas para transmitir a 100G, DP-QPSK, Detección Coherente y DSP, están bastante maduras y sus costos en bits/km han ido disminuyendo, a pesar de ser todavía muy elevados. Sin embargo, esto sólo sería económicamente factible si la demanda de tráfico es lo suficientemente alta como para justificar dicha inversión.

5.2. Recomendaciones

Con el fin de maximizar el uso de los recursos físicos instalados en la red DWDM actual, así como definir un plan de migración a velocidades mayores en función del crecimiento del tráfico, una de las tareas que pudiesen servir de complemento a este trabajo sería realizar un análisis detallado de costos de cada una de las tecnologías disponibles en el mercado para enlaces de 10G, 40G y 100G, que permitan escoger la mejor solución técnica-económica para la migración y determinar con una mejor aproximación del punto de quiebre en el que se deberían realizar las inversiones correspondientes, para cada segmento de la red en particular.

Dado que la PMD de la fibra no había sido un factor limitante en los sistemas ópticos que operan hasta ahora a 10G, y cuyo valor presenta un comportamiento estadístico, se

recomienda realizar una caracterización exhaustiva de este parámetro en todos los cables de fibra instalados, que permita determinar con precisión el valor del DGD en cada uno de los tramos, y escoger la mejor solución tecnológica al momento de realizar la migración a sistemas de 40G y 100G.

Uno de los factores que es difícil determinar en un sistema DWDM bajo cálculos teóricos, es la influencia de los efectos no lineales de la fibra para la definición del espaciamiento ideal entre canales ópticos; sobre todo en redes constituidas con distintos tipos de fibra (G.652, G.653 y G.655) en cada uno de sus tramos. En este sentido se recomienda realizar pruebas de campo en los enlaces más largos, antes de escoger algún tipo de solución técnica para realizar la migración a velocidades mayores.

- [12] Shankar H. **Duobinary Modulation for Óptical System** – Inphi Corporation. Extraído de <http://www.inphi.com/.../DuobinaryModulationForOptical> el 13 de abril de 2013 de
- [13] Borne D. – Jansen S. – Gottwald E. – Schmidt E. – Khoe G. – Waardt H. (2008), **DQPSK modulation for robust optical transmission** –White paper – Optical Society of America
- [14] Huawei (2013) **WDM Principle 40G/100G OTU Technology** - Documentación Interna - Training Center Latín American
- [15] Alzate D. – Cárdenas A. (2011) **Retos en la transmisión de 40/100Gb/s sobre fibra óptica**. Revista en Telecomunicaciones e Informática, Vol. 1, No. 2 p. 23 – 60 Medellín – Colombia
- [16] Kaminow I. – Li T. – Willner A. (2013) **Optical Fiber Telecommunications Volume VIB Systems and Networks**, Capítulo 2, p 45 – 82 Oxford: Elsevier
- [17] Recommendation ITU-T G.975.1 (2004), **Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine systems**, <http://www.itu.int/rec/T-REC-G/es>
- [18] CONATEL – **Observatorio Estadístico**- Extraído el 13 de junio de 2013 de <http://www.conatel.gob.ve>
- [19] OIF. **100G Ultra Long Haul DWDM Framework Document**. Extraído el 22 de mayo de 2013 de <http://www.oiforum.com/.../documents/OIF-FD-100G-DWDM>
- [20] Recommendation ITU-T G.959.1 (2012), **Optical transport network physical layer interfaces**, <http://www.itu.int/rec/T-REC-G/es>
- [21] EXFO (2012), **PMD Issues in Advanced, Very High-Speed Networks** – Quebec. Extraído el 15 de agosto de 2013 de <http://www.exfo.com>
- [22] Perrin S. (2010), **Getting Ready for 100G Transport Today** – White paper. Extraído el 23 de noviembre de 2013 de <http://www.heavyreading.com>
- [23] Recommendation ITU-T G.709/Y.1331 (2012), **Interfaces for the optical transport network Recommendation**, <http://www.itu.int/rec/T-REC-G/es>
- [24] LAW D (2011) **IEEE 802.3 Working Group Plenary Week** – Extraído el 15 de octubre de 2013 de <http://www.Ieee802.org/3>
- [25] IEEE Standards Association (2010) **Amendment 4: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for 40 Gb/s and 100 Gb/s Operation** .Extraído de <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.3ba-2010.html>, el 15 de octubre de 2013

- [26] Recommendation ITU-T G.671 (2012), *Transmission characteristics of optical components and subsystems*, <http://www.itu.int/rec/T-REC-G/es>
- [27] MARTÍNEZ D.- MCTI - *Red Nacional de Transporte: Territorio de inclusión tecnológica* – Extraído el 18 de marzo de 2014 de http://www.mcti.gob.ve/Tices/Proyectos/Red_Nacional_de_Transporte
- [28] BREACH T (2009), *40G and 100G Overview* - NORDUnet A/S – Extraído el 19 de octubre de 2013 de [https://portal.nordu.net/40G and 100G Overview](https://portal.nordu.net/40G%20and%20100G%20Overview)

ANEXO

RESUMEN DE LA RECOMENDACIÓN ITU-T G.709/Y.1331 OTN

La funcionalidad de una red de transporte óptico (OTN) se describe teniendo en cuenta una red óptica estructurada por capas; la característica de la información del cliente; la topología de la red y la funcionalidad de la capa red que proporciona transmisión de la señal óptica: la multiplexación, enrutamiento, la supervisión, la evaluación del desempeño y la supervivencia de la red. La parte óptica de la red se describe en términos de entidades de gestión del espectro y entidades de mantenimiento [23].

La estructura de OTN está compuesta de Canales Ópticos (OCh), Sección de Multiplexación óptica (OMS) y Sección de Transmisión Óptica (OTS), como se ve en la figura A.2.1. El transporte de una señal de cliente en OTN sigue el siguiente procedimiento:

- Primero, a la señal de cliente se añade la cabecera para formar el *Optical Channel Payload Unit* (OPU-k)
- Luego se añade una cabecera a la OPU-k formando así la *Optical Channel Data Unit* (ODU-k), con función de monitoreo del *end to end* (ODU-kP) o función de monitoreo entre conexiones tándem (ODU-kT)
- A la ODU-k se añade una cabecera adicional más el FEC para formar la *Optical Channel Transport Unit* (OTU-k) completamente estandarizado, o OTU-kV (funcionalmente estandarizado)
- Posteriormente la OTU-k / OTU-kV es mapeada sobre un canal óptico (OCh) con funcionalidad completa, o funcionalidad reducida (OChr)

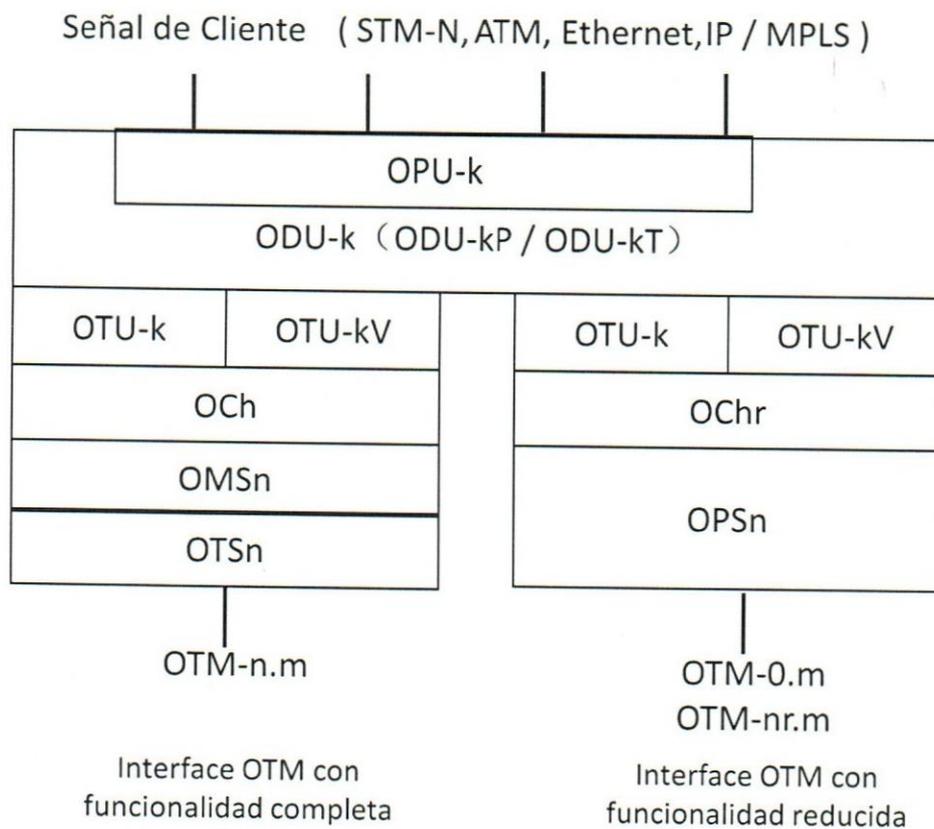


Figura A.1. Estructura de capas OTN

Las tasas de transmisión para OPU-k, ODU-k y OTU-k ($k=0, 1, 2, 3$ y 4) se encuentran especificados en la tabla A.1.

Tabla A.1. Tasas de transmisión para OPU-k, ODU-k y OTU-k ($k = 0, 1, 2, 3$ y 4)

k	OPU-k (Kbps)	ODU-k (Kbps)	OTU-k (Kbps)
0	$(238/239) \times 1.244.160$	1.244.160	
1	2.488.320	$(239/238) \times 2.488.320$	$(255/238) \times 2.488.320$
2	$(238/237) \times 9.953.280$	$(239/237) \times 9.953.280$	$(255/237) \times 9.953.280$
3	$(238/236) \times 39.813.120$	$(239/236) \times 39.813.120$	$(255/236) \times 39.813.120$
4	$(238/227) \times 99.532.800$	$(239/227) \times 99.532.800$	$(255/227) \times 99.532.800$