

Modelo Para Establecer La Migración De Red De Transporte Óptico Para Soportar Futuros Servicios Basados En La Nube Y Requerimientos De Redes Móviles De Quinta Generación

Tesis de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería de Telecomunicaciones

Presentado por Hernán Darío Yepes Montoya

Directora

PhD. Ana María Cárdenas Soto



UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
1803
FACULTAD DE INGENIERÍA

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Medellín – Colombia

Agradecimientos

A mi familia y amigos por su apoyo incondicional.

A mi asesora Ana María Cárdenas por su dedicación y apoyo durante mi proceso de formación como Ingeniero y posterior formación como Magister.

Resumen

El aumento en el número de usuarios y la aparición de tecnologías de acceso móvil y fijas con conexiones de alta velocidad permite a los operadores de red y contenido ofrecer servicios alternos a sus usuarios finales, como es el caso de los servicios basados en la nube como *IaaS*, *SaaS* y *PaaS*, donde un usuario final puede acceder a software o almacenamiento de punta solo con una conexión a internet de alta capacidad, sin necesidad de realizar grandes inversiones en hardware o software. Esto a su vez está forzando a los operadores de contenido a implementar centros de datos regionales para tener el contenido más cerca de los usuarios finales y optimizar las latencias de la red, por lo tanto las tradicionales redes de transporte están migrando hacia redes de interconexión de *data centers* o redes *intercloud* para satisfacer las demandas actuales del mercado. El objetivo de este trabajo es plantear una metodología de migración desde las redes de transporte actuales hacia las redes *intercloud* con el fin de que los operadores adapten sus redes para mantener productivas las inversiones y seguir vigentes en el mercado.

Abstract

The increase in the number of users and the appearance of mobile and fixed access technologies with high-speed connections allows network and content operators to offer alternative services to their end users, such as cloud-based services such as IaaS, SaaS and PaaS, where an end user can access software or state-of-the-art storage with only a high-capacity Internet connection, without the need to invest heavily in hardware or software. This in turn is forcing content operators to implement regional data centers to have the content closer to end users and optimize network latencies, therefore traditional transport networks are migrating to interconnection networks. data centers or inter-cloud networks to satisfy the demand of the market. The objective of this paper is to propose a migration methodology from the current transport networks to the intercloud networks in order for the operators to adapt their networks to take care of the investments and remain in force in the market.

Tabla de Contenido

Agradecimientos	3
Resumen	4
Abstract.....	5
Acrónimos.....	8
Lista de Tablas	10
Lista de Figuras.....	11
Recomendaciones	13
1. Introducción y presentación del modelo de análisis de migración.....	14
1.1. Motivación	14
1.2. Objetivos Del Proyecto.....	15
1.3. Análisis de Migración	15
1.3.1. Estado del Arte Análisis de Migración	15
1.3.2. Datos de Entrada.....	17
1.3.3. Trabajo Propuesto	19
1.3.4. Datos de Salida	19
2. Análisis de Demanda	21
2.1. Estimación del número de suscriptores de internet banda ancha fijo y móvil a 2023	21
2.1.1. Series de tiempo de la penetración de internet	22
2.1.2. Pronóstico suscripciones a Internet banda ancha fijo	23
2.1.3. Pronóstico suscripciones a Internet banda ancha móvil	25
2.2. Estimación de las velocidades de internet de banda ancha fijo y móvil a 2023.....	27
2.2.1. Evolución de la penetración de las velocidades para suscriptores de internet fijo y móvil, y abonados de internet móvil.....	27
2.3. Estimación de las velocidades de penetración de internet banda ancha.	29
3. Estudio de Tecnologías.....	33
3.1. DWDM.....	33
3.1.1. Multiplexores.....	41
3.1.2. Amplificadores Ópticos	42
3.1.3. Transmisores	49
3.1.4. Compensadores de Dispersión Cromática	51
3.1.5. OADM (Optical Add Drop Multiplexer).....	53
3.1.6. WSS (Wavelength Selective Switch)	54
3.2. Optical Transport Networks (OTN).....	57
	6

4.	Diseño de Redes de Transporte Ópticas	64
4.1.	Presupuesto de potencia óptico	64
4.2.	Análisis relación señal a ruido	66
4.3.	Latencia en redes de transporte	67
4.4.	Análisis de Dispersión	68
4.4.1.	Dispersión Cromática	69
4.5.	Dispersión por Modo de Polarización	71
4.6.	Efectos No Lineales	72
5.	Definición de Arquitecturas de Transporte	74
5.1.	Redes WDM Compensadas/Coherentes/Híbridas	74
5.2.	Redes WDM Estáticas / Dinámicas.....	76
5.3.	<i>Backhaul / Fronthaul</i> de redes móviles de próxima generación.....	76
5.4.	Redes de Interconexión de <i>Data Centers</i>	80
6.	Análisis Económico	84
6.1.	Configuración nodos capa óptica	85
6.1.1.	Nodo Amplificador.....	85
6.1.2.	Nodo Agregación Estático	87
6.1.3.	Nodo Agregación Dinámico	90
6.2.	Análisis Capex.....	92
6.3.	Modelo de Costos.....	93
6.4.	Análisis Opex	96
6.5.	Análisis de Integridad de la Red	96
7.	Caso de Estudio	99
8.	Conclusiones y Trabajo Futuro.....	112
	REFERENCIAS.....	113

Acrónimos

ASE	Amplified Spontaneous Emission
AWG	Arrayed Waveguide Gratings
BBU	Base Band Unit
BSC	Base Station Controller
Capex	Capital Expenditures
CDF	Cumulative Density Function
CPRI	Common Primary Radio Interface
DBR	Distributed Bragg Reflector
DCI	Data Center Interconection
DFB	Distributed Feedback Lasers
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
FWM	Four Wave Mixing
IPR	Internet Protocol Routers
IaaS	Infraestructure as a Service
LAN	Local Area Network
MDT	Mean Downtime
MLM	Multiple Longitudinal Mode
MPLS	Multiprotocol Label Switching
MPLS-TP	Multiprotocol Label Switching – Transport Profile
MTBF	Mean Time between Failures
MTTR	Mean Time to Repair
OADM	Optical ADD DROP Multiplexer
OADM	Optical Add Drop Multiplexer
ODU	Optical Data Unit
Opex	Operating expense
OPU	Optical Payload Unit

OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
OTN	Optical Transport Network
OTU	Optical Transport Unit
OXC	Optical Cross Connect
PDF	Probability Density Function
PaaS	Platform as a Service
REMM	Reliability Enhancement Methodology & Modeling
RNC	Radio Network Controller
RRU	Radio Remote Unit
SaaS	Software as a Service
SAN	Storage Area Network
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SLM	Single Longitudinal Mode
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
SPM	Self Phase Modulation
SVBT	Sliceable Bandwidth Variable Transponder
TCO	Total Cost Ownership
TDM	Time Division Multiplexing
TTF	Time to Failure
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WSS	Wavelength Selective Switch
XPM	Cross Phase Modulation

Lista de Tablas

Tabla 1-1. Estado del arte de las metodologías de migración de redes de transporte	16
Tabla 2-1. Serie datos históricos de penetración de Internet banda ancha	22
Tabla 2-2 . Nueva serie calculada y la estimación del error	23
Tabla 2-3 Pronóstico de demanda internet banda ancha fijo a 2023 para Colombia	24
Tabla 2-4. Pronóstico número de suscriptores a internet banda ancha	25
Tabla 2-5. Penetración internet banda ancha móvil.....	26
Tabla 2-6. Pronóstico suscriptores Internet banda ancha móvil.....	26
Tabla 2-7. Promedio abonados móviles.....	27
Tabla 2-8. Estimación velocidad internet fijo (Porcentaje).....	29
Tabla 2-9. Estimación velocidad internet fijo (Capacidad).....	30
Tabla 2-10. Pronóstico penetración velocidad suscriptores móviles.....	30
Tabla 2-11. Pronóstico de capacidad suscriptores móviles.....	30
Tabla 2-12. Pronóstico penetración velocidad abonado móvil	30
Tabla 2-13. Pronóstico de capacidad abonados móviles	31
Tabla 2-14. Consolidado de las tres estimaciones de capacidad en bps, por tipo de usuario y su consolidado	31
Tabla 3-1. Descripción de las bandas de transmisión de la fibra óptica	35
Tabla 3-2. Resumen recomendación ITU-T G.652.....	36
Tabla 3-3. Resumen recomendación ITU-T G.653.....	38
Tabla 3-4. Resumen recomendación ITU-T G.655.....	39
Tabla 3-5. Parámetros de diseño componentes ópticos.	40
Tabla 3-6. Asignación de frecuencias recomendación ITU-T G.694.1.....	55
Tabla 3-7. Tasas de bit nominales OTN	61
Tabla 3-8. Esquemas de FEC recomendación ITU-T G-975.1 / G.709	62
Tabla 3-9. Características FEC recomendación ITU-T G-975 / G.709	62
Tabla 5-1. Requerimientos de OSNR para modulaciones de nivel superior	75
Tabla 5-2. Requerimientos y tecnologías óptimas para DCI	83
Tabla 6-1. Modelo De Costos Elementos Capa Óptica	94
Tabla 6-2. Modelo De Costos Tipos de Nodos	95
Tabla 7-1. Distancias consideradas en el caso de estudio.....	100
Tabla 7-2. Resumen Análisis Técnico.....	104
Tabla 7-3. Costo asociado a la migración hacia el escenario 1	106
Tabla 7-4. Requerimientos de cambio de amplificadores en el escenario 2.....	107
Tabla 7-5. Costo asociado a la migración hacia el escenario 2	109
Tabla 7-6. Resultados capacidad máxima por canal por enlace.....	110

Lista de Figuras

Figura 1-1. Metodología de Migración Propuesta.....	17
Figura 2-1 Estimaciones y proyecciones de población total, urbana y rural, y económicamente activa.....	24
Figura 2-2. Personas por Hogar.....	25
Figura 2-3. Evolución velocidades banda ancha fijo.....	28
Figura 2-4. Evolución porcentual banda ancha suscriptores móviles	28
Figura 2-5. Evolución porcentual banda ancha abonados móviles	28
Figura 2-6. Estimación demanda de capacidad bps Colombia	31
Figura 3-1. Técnicas de multiplexación en el tiempo y en frecuencia o longitud de onda. 33	
Figura 3-2. Ventanas de Transmisión fibra óptica. Tomada de [21].....	34
Figura 3-3. Características Fibras Ópticas Momo-Modo. Tomado de [21]	35
Figura 3-4. Multiplexores basados en rejillas de difracción. Tomada de [23].....	42
Figura 3-5. Multiplexores basados en AWG. Tomada de [23].....	42
Figura 3-6. Emisión estimulada y absorción en un sistema atómico de dos niveles de energía. Tomada de [20]	44
Figura 3-7. Diagrama de niveles de energía simplificador para un EDFA con bombeo cercano a 980nm. Tomado de [30]	45
Figura 3-8. Sistema de 3 niveles usado para el modelo del amplificador. Tomada de [31].	45
Figura 3-9 Curva de ganancia Raman en fibra de Silicio. Diagrama de nivel de energía del proceso Raman, el cual toma un fotón de mayor energía y lo divide en un fotón y un fonón de menor energía, Tomada de [33].....	47
Figura 3-10 Configuración amplificador Raman. Tomada de [32].....	47
Figura 3-11 Espectro de ganancia Raman usando dos laser de bombeo. Tomada de [33], [34]	48
Figura 3-12. Espectro de ganancia Raman banda C+L usando 12 laser de bombeo. Tomada de [33], [34]	48
Figura 3-13. Espectro de salida de un laser MLM, Tomada de [20].....	50
Figura 3-14. Espectro de salida de un laser SLM. Tomada de [20]	50
Figura 3-15. Modulación directa de un láser. Tomada de [22]	51
Figura 3-16. Transmisor basado en modulador externo. Tomada de [22]	51
Figura 3-17. Compensador de dispersión basado en rejillas de Bragg. Tomado de [20]..	52
Figura 3-18. Ubicación DCM en sistemas DWDM.....	52
Figura 3-19. Esquema básico Optical Add Drop Multiplexer. Tomada de [35]	53
Figura 3-20. OADM basado en rejillas y acopladores. Tomada de [36].....	53
Figura 3-21. OADM basado en rejillas y circuladores. Tomada de [36]	53
Figura 3-22. Esquema genérico de un WSS, Tomada de [37].....	54
Figura 3-23. Ejemplo del uso de la grilla flexible en sistemas DWDM. Tomada de [27] ...	56
Figura 3-24. Relación Tasa de bit, formato de modulación, y ancho del slot de frecuencia. Tomada de [39].....	56
Figura 3-25. Distribución de longitudes de onda en un sistema DWDM.....	57
Figura 3-26. Encabezados OPU/ODU/OTU.....	59
Figura 3-27. Jerarquía OTN	60
Figura 3-28. Capas Digitales y Ópticas OTN en una red WDM	60

Figura 4-1. Modelo de presupuesto de potencia para un enlace mono canal	64
Figura 4-2. Modelo de presupuesto de potencia para un enlace WDM	65
Figura 4-3. Cálculo de potencia de salida por canal.....	65
Figura 4-4. OSNR para un sistema con un amplificador EDFA en recepción.....	67
Figura 4-5. Sistema DWDM compensado en topología punto a punto	70
Figura 4-6. Análisis de dispersión en un sistema DWDM compensado.....	70
Figura 4-7. Sistema DWDM coherente en topología punto a punto.....	71
Figura 4-8. Análisis de Dispersión en un sistema DWDM Coherente	71
Figura 5-1. Arquitectura de redes móviles 2G/3G/4G.....	77
Figura 5-2. Evolución en las arquitecturas de las estaciones base.....	79
Figura 5-3. Redes Heterogeneas y backhaul con múltiples dispositivos y aplicaciones. Tomada de [58].....	79
Figura 5-4. Arquitectura actual de las redes de data centers. Tomada de [59]	80
Figura 5-5. Evolución de las distancias de conexión inter-data center. Tomada de [61]...	81
Figura 5-6. Pronóstico de Mercado de equipos de Comunicaciones ópticas (2017-2022). Tomada de [62].....	82
Figura 5-7. Arquitectura regional de conexión inter data center. Tomada de [66]	84
Figura 6-1. Esquema de amplificación EDFA en transmisión y recepción para redes coherentes	86
Figura 6-2. Esquema de amplificación EDFA en transmisión y recepción para redes compensadas.	86
Figura 6-3. Esquema de amplificación EDFA en transmisión y EDFA / RAMAN en recepción para redes coherentes.....	86
Figura 6-4. Esquema de amplificación EDFA en transmisión y EDFA / RAMAN en recepción para redes compensadas	87
Figura 6-5. Esquema de amplificación EDFA / RAMAN en transmisión y EDFA / RAMAN en recepción para redes coherentes.....	87
Figura 6-6. Esquema de amplificación EDFA / RAMAN en transmisión y EDFA / RAMAN en recepción para redes compensadas.	87
Figura 6-7. Nodo de agregación estático simple basado en Multiplexores.	88
Figura 6-8. Nodo de agregación estático de dos grados basado en Multiplexores.	89
Figura 6-9. Nodo de agregación estático de tres grados basado en Multiplexores.	89
Figura 6-10. Nodo de agregación estático de dos grados basado en OADM.....	90
Figura 6-11. Arquitecturas WSS Broadcast and Select y Route and Select	91
Figura 6-12. ROADM grado 2 basado en WSS Broadcast and Select	91
Figura 6-13. ROADM grado 4 basado en WSS Route and Select.....	92
Figura 6-14. Función de densidad acumulada gaussiana y la función de confiabilidad asociada. Tomada de [80].....	97
Figura 7-1. Red de Transporte RENATA. Tomada de [81].....	99
Figura 7-2. Mapa de cables submarinos en Colombia en 2018. Tomada de [81].....	100
Figura 7-3. Matriz de Tráfico considerada	102
Figura 7-4. Análisis de OSNR, Latencia y Dispersión para el enlace Barranquilla – Bogotá	103
Figura 7-5. Posibilidades de crecimiento basadas en el OSNR del tramo.....	105
Figura 7-6. Posibilidades de crecimiento basadas en la dispersión cromática del tramo	105

Recomendaciones

ITU-T G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable

ITU-T G.653: Characteristics of a dispersion-shifted, single-mode optical fibre and cable

ITU-T G.655: Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable

ITU-T G.672: Characteristics of multi-degree reconfigurable optical add/drop multiplexers

ITU-T G.694.1: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid

ITU-T G.697: Optical monitoring for dense wavelength division multiplexing systems

ITU-T G.698.1: Multichannel DWDM applications with single-channel optical interfaces

ITU-T G.698.2: Amplified multichannel dense wavelength division multiplexing applications with single channel optical interfaces

ITU-T G.959.1: Optical transport network physical layer interfaces

ITU-T G.975.1: Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine systems

ITU-T G.975: Forward error correction for submarine systems

ITU-T G Supplement 39: Optical system design and engineering considerations

ITU-T G Supplement 56: OTN transport of CPRI signals

ITU-T G Supplement 58: Optical transport network module framer interfaces

1. Introducción y presentación del modelo de análisis de migración.

Con el objetivo de interconectar usuarios finales a nivel residencial y corporativo se definen diversos tipos de redes con base en su mercado objetivo, dentro de las que se encuentran: **las redes de acceso**, las cuales proveen conexiones de última milla a múltiples usuarios en configuraciones punto a punto (corporativo) o punto a multipunto (residencial); **redes de agregación o metropolitanas** las cuales agregan el tráfico de los diferentes nodos de acceso y lo llevan a un punto o cabecera central (llámese central de conmutación o *data center*) donde predominan topologías en anillo o malladas y; por último se encuentran **las redes de transporte**, las cuales tienen un alcance nacional, encargadas de agregar y transportar el tráfico de una ciudad hacia un punto de salida de cable submarino o hacia los *data centers*. Este último tipo de redes se constituyen en el foco de análisis de la presente tesis de maestría.

1.1. Motivación

Independiente del segmento de mercado, una de las razones de ser de las redes de comunicaciones es interconectar dispositivos que tienen información almacenada. Empresas de contenido como Google, Facebook, Amazon, entre otras, tienen en sus centros de datos servidores con gran cantidad de información que debe ser enviada a través de internet hacia sus usuarios finales y replicada entre sus servidores para mantener niveles de disponibilidad adecuados. Las empresas de telecomunicaciones responden a esta demanda implementando redes de transporte de alta capacidad y escalabilidad a nivel mundial en segmentos submarinos, nacionales y metropolitanos para permitir que el contenido llegue a los usuarios finales. Por esta razón, en los últimos años las empresas de contenido son los clientes principales de las empresas de telecomunicaciones que poseen redes de transporte.

No obstante, aplicaciones en tiempo real y la aparición de nuevos protocolos de transporte con requerimientos estrictos de latencia, obligaron a los proveedores de contenido a tener la información cada vez más cerca del usuario final, siendo necesario implementar *data centers* regionales de menor escala a los *data centers* tradicionales. Por otro lado, con el aumento en el número de usuarios de internet y el aumento en los anchos de banda de las conexiones residenciales, permitieron la aparición de servicios en la nube como infraestructura, software y plataformas como un servicio (*IaaS/SaaS/PaaS*), por lo que se hace necesario que las compañías prestadoras de este tipo de servicios tengan a su disposición interconexiones con alta disponibilidad, seguridad y ultra baja latencia.

Las empresas de telecomunicaciones deben responder a este nuevo esquema de interconexión, donde la capacidad sigue siendo un factor importante, pero factores como la latencia, los esquemas de seguridad y el bajo *footprint* y consumo de energía de sus redes se convierten en un factor decisivo a la hora de mantener unos niveles de servicio adecuados a lo que pide el mercado.

Por esta razón, se habla de migración de redes de transporte a redes *inter-cloud*. La motivación de este trabajo surge de la necesidad de las empresas que poseen redes de

transporte para adaptar sus redes actuales hacia las nuevas arquitecturas planteadas en este segmento de la red de telecomunicaciones, teniendo en cuenta tres aspectos estrechamente relacionados entre sí: la determinación de la demanda esperada, el análisis de la infraestructura tecnológica requerida para satisfacer dicha demanda y el análisis económico que determina la estrategia más adecuada.

1.2. Objetivos Del Proyecto

Objetivo General

Desarrollar un modelo de análisis para migración de las redes de transporte ópticas actuales hacia redes *inter-cloud*, con base en la evaluación de distintas arquitecturas y tecnologías que se prevé serán usadas en las redes *inter-cloud*, considerando las inversiones existentes.

Objetivos Específicos

Objetivo 1: Estimar la futura demanda de conectividad, a partir de análisis de tendencia, con el propósito de realizar un análisis del impacto del pronóstico de demanda sobre las redes de transporte actual.

Objetivo 2: Evaluar, bajo el punto de vista técnico y económico, distintas arquitecturas de la capa de transporte óptica, para la adaptación de redes actuales WDM (Wavelength Division Multiplexing) que satisfagan las necesidades de las plataformas *clouds*.

Objetivo 3: Obtener un modelo general que incluya los aspectos de demanda, tecnológicos y económicos, a partir del cual se puedan realizar distintos análisis de sensibilidad.

Objetivo 4: Presentar un caso de estudio para aplicación del modelo de análisis propuesto, en la red académica de alta velocidad RENATA (Red Nacional Académica de Tecnología Avanzada).

1.3. Análisis de Migración

1.3.1. Estado del Arte Análisis de Migración

En esta sección se muestran algunos trabajos anteriores en los que se han establecido modelos de migración de redes de transporte óptico para todos los cambios significativos o tecnologías emergentes importantes. Con base en esta revisión de antecedentes, se hace una propuesta de metodología para analizar la migración de redes de transporte a redes *inter-cloud*, objetivo principal del presente trabajo de investigación.

Para comenzar, en la referencia [1] se presenta un análisis a nivel de Capex/Opex para la migración desde sistemas SDH a sistemas DWDM/OTN. En la referencia [2] se realiza un análisis de migración a nivel de Capex para la migración de redes DWDM opacas (con regeneración óptica en cada nodo de apertura de tráfico) hacia sistemas DWDM híbridos basados en ROADMs WSS. En la referencia [3] se propone una metodología de migración

para diversos escenarios iniciales y finales, en el cual dependiendo del modelo de tráfico, periodo de operación, instantes de inversión, escenarios iniciales y finales, se realiza un análisis de nivel de Capex y Opex. Finalmente, en las referencias [4],[5],[6] se realizan análisis de Capex y técnicos para la migración de los sistemas *Fixed-Grid* hacia sistemas *Flex-Grid*. Un resumen del estado del arte consultado de las metodologías de migración de redes de transporte, se presenta en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1. Estado del arte de las metodologías de migración de redes de transporte

<u>Autor</u>	<u>Año</u>	<u>Tecnología</u>	<u>Análisis Realizados</u>
M. Jaeger [1]	2010	SDH a DWDM/OTN	Capex /Opex
O. Renais [6]	2010	Redes WDM Opacas a Redes WDM Híbridas (Basadas en WSS)	Capex
A.Leiva [3]	2013	Red estática a 10Gb/s – Red estática a 40Gb/s. Red estática a 10Gb/s – Red dinámica a 40Gb/s (Incluyendo plano de control)	Capex /Opex Metodología para diversos escenarios de migración
A.Mayoral [2]	2013	DWDM <i>Fixed Grid</i> – DWDM <i>FlexGrid</i>	Capex
M. Ruiz [5]	2014	DWDM <i>Fixed Grid</i> – DWDM <i>FlexGrid</i>	Análisis Técnico
X. Yu [4]	2015	DWDM <i>Fixed Grid</i> – DWDM <i>FlexGrid</i> en escenarios “ <i>Brown-Field</i> ”	Análisis Técnico

Nota: Las metodologías de migración incluidas en el estado del arte corresponden solo a análisis de la capa óptica.

El modelo propuesto en este trabajo sigue el modelo planteado en la referencia [3], agregando mayor detalle en el análisis técnico y planteando escenarios iniciales y finales de acuerdo con la situación actual de los operadores y los requerimientos de redes de nueva generación, los cuales son más estrictos a nivel de latencia y ancho de banda.

El modelo adaptado y propuesto en este trabajo se presenta en la Figura 1-1. El escenario inicial considerado para las redes de transporte ópticas actuales se basa en sistemas WDM con arquitecturas de regeneración híbridas y asignación de espectro fijo (*Fixed Grid*). Se consideran dos escenarios finales para los requerimientos de las redes de transporte de próxima generación, el primero diseñado para soportar *backhaul* de redes móviles de quinta generación y el segundo para soportar interconexión de *data centers*. El análisis económico considera costos de capital (Capex) y gastos operacionales (Opex). El análisis técnico se basa en la arquitectura de red detallada, la estrategia de asignación de espectro, el análisis de desempeño óptico y las posibles estrategias de migración.



Figura 1-1. Metodología de Migración Propuesta.

A continuación se da una explicación de alto nivel de los datos de entrada técnicos y económicos del modelo de migración, se describe el trabajo y los análisis a realizar como trabajo propuesto y se especifican los parámetros de salida del sistema.

1.3.2. Datos de Entrada

Siguiendo el modelo propuesto en la Figura 1-1, en esta sección se analiza lo referente a los datos de entrada.

Escenario inicial de red

Como escenario inicial se considera una red de transporte basada en tecnología DWDM de tipo estática, donde el aprovisionamiento y enrutamiento se realiza de forma manual realizando interconexiones físicas en los puntos de agregación y desagregación óptica y donde la protección de servicios se realiza en una capa superior y compensada. Las características consideradas son las siguientes:

- Red DWDM de 40 canales con separación de 100GHz siguiendo la recomendación ITU-T G.694.1
- Fibra estándar G.652 D
- Red compensada, con tasa de transmisión máxima de 10Gb/s por canal

- Agregación de tráfico basada en Multiplexores y OADM
- Interfaces de desagregación a 10Gb/s y 1.25Gb/s

Escenario final de red

Con el fin de cumplir con los requerimientos de ancho de banda y latencia (a ser presentados en la sección 5.4) de las arquitecturas de interconexión de *data centers* y las arquitecturas de red móvil de quinta generación, las redes de transporte deben cumplir los siguientes requisitos principales:

- Minimizar latencia
- Optimizar uso del espectro disponible
- Aumentar ancho de banda total por par de fibra
- Garantizar la disponibilidad de la red para cumplir los acuerdos de nivel de servicio

Para cumplir los objetivos anteriores, se requieren arquitecturas que optimicen la relación señal a ruido del sistema para mantener el menor número posible de puntos de regeneración, eliminen elementos que impacten en la latencia de las redes como es el caso de los compensadores de dispersión basados en fibra, implementen un plano de control (GMPLS o SDN) que permita el aprovisionamiento, enrutamiento y restauración de los servicios ante múltiples eventos de fibra simultáneos y optimicen el uso espectral de los diferentes servicios en la red mediante tecnologías *flexgrid*. De esta forma se proponen los siguientes escenarios finales:

Escenario Final 1: Migración de redes estáticas a redes dinámicas, permitiendo diferentes escenarios de restauración en capa óptica basada en arquitecturas ROADM Directionless

Escenario Final 2: Migración de redes compensadas a redes coherentes o redes híbridas con compensadores de dispersión basados en rejillas de *Bragg*.

Modelo de Tráfico

La matriz de tráfico inicial considera escenarios típicos de conexiones entre los principales nodos de la red y la conexión de los puntos de llegada de cables submarinos con las principales ciudades del país. La capacidad final de la red debe estar diseñada para cubrir el tráfico estimado presentado de los próximos cinco años presentado en la Figura 2-6.

Periodo de Operación e Instantes de Inversión

Conociendo la capacidad final para la cual la red está diseñada, la capacidad inicial instalada y la tasa de crecimiento esperado, es posible calcular el periodo de operación estimado con el fin de determinar la ventana de tiempo que la red podrá operar sin ser necesario una actualización del sistema [3].

Para realizar el análisis de Capex y Opex es necesario conocer la estrategia de inversión que será usada por el operador, ya que normalmente el valor de los equipos disminuye con el tiempo debido a la llegada de nuevas tecnologías o a la madurez del producto [7].

1.3.3. Trabajo Propuesto

Con el fin de definir los pasos para la migración de las redes de transporte hacia los escenarios planteados, se presentan a continuación en detalle los siguientes ítems:

Estimación del crecimiento de la demanda

Se realiza una estimación de la demanda agregada nacional para los próximos cinco años basada en predicciones de penetración de internet y de velocidades de servicio de internet fijo y móvil tomando como base estadísticas del MinTIC y la OCDE.

Arquitectura Detallada de Red

La arquitectura detallada de red presenta los tipos de nodos usados tanto a nivel de amplificación como a nivel de agregación y desagregación de tráfico. Para conocer en detalle las arquitecturas de red de transporte ver los capítulos 3 al 5.

Análisis de desempeño óptico

Se presentan análisis de nivel de relación señal a ruido y dispersión cromática para determinar la tasa de bit y distancia máxima que puede ser implementada en un canal de la red y análisis de latencia para verificar los requerimientos de las redes de interconexión de *data centers* y de *backhaul/fronthaul* móvil presentadas en la sección 5.3 y 5.4.

Posibles estrategias de migración

Recomendaciones puntuales sobre los puntos de mejora y cambios requeridos para implementar los escenarios de red propuestos.

1.3.4. Datos de Salida

Gastos de Capital

Se presentan los gastos de capital asociados al pasar del escenario inicial hacia cada uno de los escenarios finales. Se toma como referencia la configuración de los nodos de la capa óptica propuesta en la sección 6.1 y los valores de referencia resumidos en la sección 6.3.

Gastos Operacionales

Se considera el modelo de gastos operacionales del capítulo 6.4.

En consecuencia con lo anterior, el presente documento sigue el orden que se presenta a continuación:

El capítulo 1 presenta la introducción, motivación y objetivos del trabajo, presenta los antecedentes y estado del arte de los modelos de migración de redes de transporte y define el modelo a desarrollar en los capítulos posteriores.

El capítulo 2 de este trabajo realiza una estimación de demanda de capacidad en Colombia para los próximos cinco años basado en una predicción de número de usuarios, penetración

y tasas de bit de acceso móvil y fijo usando como base las estadísticas de los últimos años proporcionadas por entidades como MinTIC y OECD. Los capítulos 3, 4 y 5 componen el análisis técnico del modelo, donde se estudia las tecnologías, arquitecturas de red y sus respectivas implicaciones de diseño. El capítulo 6 presenta el análisis económico basado en Capex y Opex y el capítulo 7 presenta un caso de estudio en la red universitaria nacional.

2. Análisis de Demanda

Estimar el ancho de banda resulta importante para determinar las condiciones extremas de operación de la red y de los equipos de conmutación, puesto que es la máxima capacidad de transporte de señal. Por su parte, el tráfico se refiere a las condiciones de uso esperado del ancho de banda, en cuanto a los tiempos conexión y la simultaneidad de las peticiones de acceso a la red.

Con el fin de observar el comportamiento de la evolución del ancho de banda y tráfico, este capítulo se dedica a la realización de un análisis de sensibilidad de la demanda de ancho de banda, tomando como referencia el caso de Colombia. Cabe anotar que el horizonte de tiempo para este pronóstico es al año 2023.

El modelo que se aplica en este trabajo de investigación relaciona el ancho de banda con la penetración del acceso a Internet y con la velocidad promedio de transmisión por usuario. Se basa en el modelo trabajado en [8].

En primer lugar se presentará el análisis de tendencia de suscripciones de internet de banda ancha fijo y móvil, considerando que son estos los que aportan un mayor consumo de ancho de banda de la red. Luego se sensibilizará la capacidad de acuerdo con dos escenarios, uno pesimista y uno optimista, en cuanto a la evolución esperada de la penetración de las distintas velocidades de acceso.

2.1. Estimación del número de suscriptores de internet banda ancha fijo y móvil a 2023.

La conexión de usuarios a internet presenta un comportamiento de difusión muy predecible: En las etapas iniciales del proceso de difusión hay una tasa de aceleración de vinculación de adoptadores a la red. Con el transcurso del proceso de difusión, se presenta una desaceleración en la tasa de adoptadores hasta hacerse cero cuando la población potencial ha sido abarcada por completo. La cantidad acumulada de adoptadores en el tiempo muestra una forma "S"; de allí el nombre de curva "S".

Según los análisis realizados sobre el conjunto de datos del crecimiento de internet, la curva Gompertz presenta una buena aproximación de su proceso de difusión [9], [10]

La expresión matemática de la curva Gompertz es la siguiente:

$$P_t = P \cdot \left(1 - e^{-\lambda t} \right)^{-\lambda} \quad (2-1)$$

Donde P_t es la penetración acumulada del bien o servicio, P es el punto de saturación para el mercado estudiado, λ y λ son los coeficientes que indican la tasa de penetración.

La curva Gompertz es asimétrica, alcanzando el punto de inflexión en el punto de las ordenadas correspondiente a $P_t = 0.37P$, cuando el tiempo de inflexión $t_i = P/\lambda$. Para averiguar los parámetros λ y λ , la ecuación anterior se linealiza aplicando logaritmos

neperianos, para luego aplicar el método de mínimos cuadrados ordinarios. El término ϵ_t , que es el error estocástico obtenido al aplicar el método MCO.

$$\ln\left[-\ln \frac{1 - \hat{y}_t}{y_t}\right] = \ln \alpha - \beta y_t \quad (2-2)$$

Esta es la curva que utilizaremos para encontrar una expresión que nos permita describir y predecir el comportamiento de la penetración del servicio de internet

2.1.1. Series de tiempo de la penetración de internet

Para realizar el análisis de tendencia se requieren datos históricos de la variable que se quiere predecir. Para el caso particular se consultó la base de datos de la OECD, la cual para Colombia indica las siguientes series de interés:

Tabla 2-1. Serie datos históricos de penetración de Internet banda ancha.

<u>Periodo</u>	<u>Fijo (%)</u>	<u>Móvil (%)</u>
2009-Q4	4,93	9,54
2010-Q2	5,4	8,53
2010-Q4	5,83	26,08
2011-Q2	6,64	29,76
2011-Q4	7,24	35,73
2012-Q2	7,75	9,52
2012-Q4	8,37	13,69
2013-Q2	9,22	17,17
2013-Q4	9,55	22,78
2014-Q2	10,04	31,16
2014-Q4	10,6	37
2015-Q2	11,22	35,02
2015-Q4	11,39	42,06
2016-Q2	11,91	42,28
2016-Q4	12,13	46,78
2017-Q2	12,77	48,72
2017-Q4	12,82	48,62

Referencia [11] Consultada en Noviembre 5 de 2018

En este punto conviene hacer una distinción que se encuentra en los informes del MINTIC, referente a los usuarios de internet móvil:

(...) Acceso por Suscripción: Corresponde al acceso a Internet móvil a través de la contratación de un plan con cargo fijo que se paga de forma periódica. El acceso a Internet debe tener en cuenta la definición establecida en el ARTÍCULO 1.3 del TÍTULO I o aquella que la modifique, adicione o sustituya, es decir, no se deben considerar accesos que únicamente hagan uso de redes privadas (...).

(...) Acceso por demanda: Corresponde al acceso a Internet móvil sin que medie la contratación de un plan para tal fin. El acceso a Internet debe tener en cuenta la definición establecida en el ARTÍCULO 1.3 del TÍTULO I o aquella que la modifique, adicione o sustituya, es decir, no se deben considerar accesos que únicamente hagan uso de redes privadas (...).

Para cada tipo de usuario se hace su análisis de demanda correspondiente.

2.1.2. Pronóstico suscripciones a Internet banda ancha fijo

Aplicando la expresión 3-2 a los datos correspondientes de la Tabla 2-1 y aplicando estimación lineal, se encuentran los siguientes valores de los coeficientes a y b .

$$a = 0,1092 \quad b = 0,3159 \quad (2-3)$$

La nueva serie encontrada con estos parámetros se compara con los datos históricos, y se estima el error cuadrático medio (MSE) y el error porcentual absoluto medio (MAPE).

Tabla 2-2 . Nueva serie calculada y la estimación del error.

<u>Periodo</u>	<u>OCDE (%)</u>	<u>Estimado (%)</u>	<u>MSE</u>	<u>MAPE (%)</u>
2009-Q4	4,93	4,68	0,06124197	5,024
2010-Q2	5,4	5,31	0,00684069	1,533
2010-Q4	5,83	5,96	0,01670835	2,219
2011-Q2	6,64	6,6	0,00198197	0,67
2011-Q4	7,24	7,23	0,000026653	0,071
2012-Q2	7,75	7,85	0,0104432	1,319
2012-Q4	8,37	8,45	0,00631048	0,949
2013-Q2	9,22	9,03	0,03900616	2,141
2013-Q4	9,55	9,58	0,00104204	0,338
2014-Q2	10,04	10,1	0,00320174	0,563
2014-Q4	10,6	10,59	0,00004879	0,066
2015-Q2	11,22	11,05	0,02860429	1,507
2015-Q4	11,39	11,49	0,00903185	0,834
2016-Q2	11,91	11,89	0,00068299	0,219
2016-Q4	12,13	12,26	0,0161545	1,048
2017-Q2	12,77	12,6	0,02931978	1,341
2017-Q4	12,82	12,92	0,00885851	0,734
Total			0,01	1,21
Penetración Internet banda ancha fijo				

Este fue el mínimo error encontrado, usando como valor de saturación $a = 16$. a_0 es la penetración de internet acumulada para el año 0.

Dado que ya se tiene unos parámetros a y b ajustados por el cálculo del error, ahora se usan para hacer el pronóstico hasta el año 2023, incrementando el parámetro α . En la ecuación 3-2. El pronóstico es el siguiente:

Tabla 2-3 Pronóstico de demanda internet banda ancha fijo a 2023 para Colombia

<u>Periodo</u>	<u>Pronóstico (%)</u>
2018-Q2	13,2
2018-Q4	13,47
2019-Q2	13,71
2019-Q4	13,93
2020-Q2	14,13
2020-Q4	14,32
2021-Q2	14,48
2021-Q4	14,63
2022-Q2	14,77
2022-Q4	14,89
2023-Q2	15
2023-Q4	15,1

Penetración Internet banda ancha fijo

Para convertir estos datos en número de suscripciones, se parte del hecho que se trata de hogares. Para hacer el pronóstico de hogares se consultó el pronóstico de crecimiento de población del país, y la tendencia del número de personas por hogar. Ambas tendencias se ilustran en la Figura 2-1 [11] y Figura 2-2 [12] .

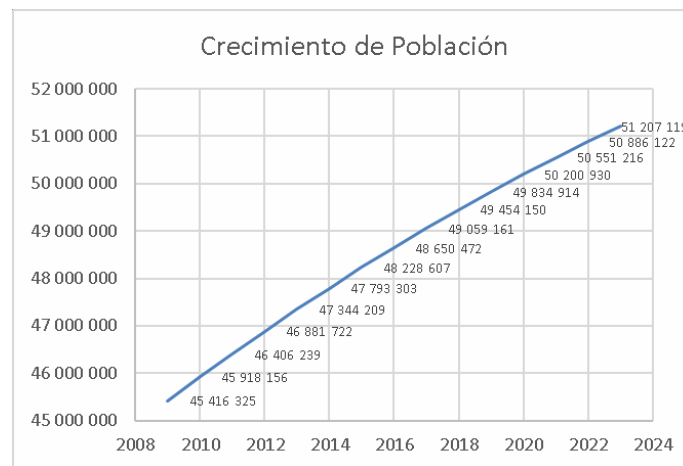


Figura 2-1 Estimaciones y proyecciones de población total, urbana y rural, y económicamente activa.

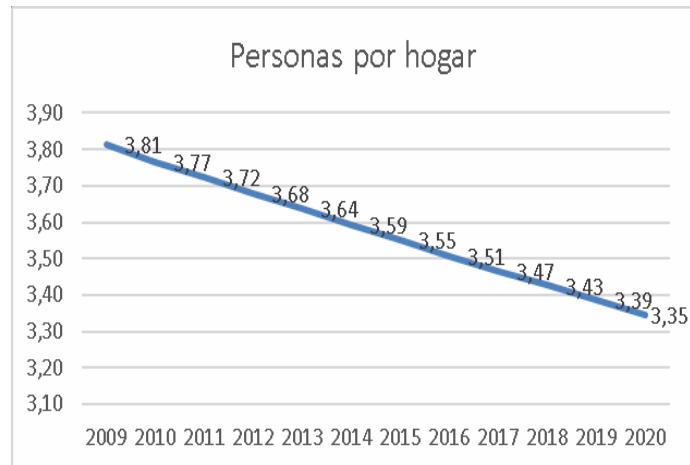


Figura 2-2. Personas por Hogar.

Con esta estimación, el número de suscriptores esperados hasta 2023 es el siguiente:

Tabla 2-4. Pronóstico número de suscriptores a internet banda ancha

<u>Periodo</u>	<u>Pronóstico penetración (%)</u>	<u>Población total</u>	<u>Pronóstico suscripciones a internet</u>
2018-Q4	13,47	49 454 150	6661242
2019-Q4	13,93	49 834 914	6943176
2020-Q4	14,32	50 200 930	7186693
2021-Q4	14,63	50 551 216	7396522
2022-Q4	14,89	50 886 122	7577291
2023-Q4	15,1	51 207 119	7733365

Pronóstico número de suscriptores a internet de banda ancha fijo

2.1.3. Pronóstico suscripciones a Internet banda ancha móvil

Este pronóstico se hace siguiendo el mismo procedimiento de la sección 2.1.2. Los datos históricos igual fueron tomados de las bases de datos de la OECD, mostrados en la Tabla 1-1. Estos datos tienen un comportamiento que se sale de una tendencia entre 2009 y 2011, por lo cual los cálculos se hicieron a partir de 2012. Nuevamente aplicando la expresión 3-2 a los datos correspondientes de la Tabla 1-1, y aplicando estimación lineal, se encuentran los siguientes valores de los coeficientes a y b.

$$a = -0,1036 \quad b = 0,6779 \quad (2-4)$$

La nueva serie encontrada con estos parámetros se compara con los datos históricos, y se estima el error cuadrático medio (MSE) y el error porcentual absoluto medio (MAPE).

Tabla 2-5. Penetración internet banda ancha móvil

<u>Período</u>	<u>OECD (%)</u>	<u>Estimación (%)</u>	<u>MSE</u>	<u>MAPE (%)</u>
2012-Q4	13,69	16,93551	10,53335	23,70718
2013-Q2	17,17	20,17098	9,005881	17,47804
2013-Q4	22,78	23,61457	0,689852	3,645424
2014-Q2	31,16	27,22035	15,48937	12,63209
2014-Q4	37	30,94078	36,65363	16,36498
2015-Q2	35,02	34,72889	0,085911	0,83692
2015-Q4	42,06	38,54005	12,41826	181,5197
2016-Q2	42,28	42,33321	0,002422	146,5534
2016-Q4	46,78	46,07192	0,501374	102,2117
2017-Q2	48,72	49,72476	1,009545	59,59931
2017-Q4	48,62	53,26558	21,5721	43,98048
Total			9,814699	55,32084

Penetración internet banda ancha móvil

Este fue el menor error encontrado con factor de saturación $\square = 100$. Como estas suscripciones son individuales, entonces se utilizará el porcentaje de penetración sobre la población total esperada hacia 2023, para determinar el pronóstico de usuarios con internet banda ancha móvil.

Tabla 2-6. Pronóstico suscriptores Internet banda ancha móvil

<u>Periodo</u>	<u>Pronóstico (%)</u>	<u>Población total</u>	<u># suscriptores</u>
2018-Q4	59,93	49 454 150	29638970
2019-Q4	65,96	49 834 914	32871518
2020-Q4	71,3	50 200 930	35795667
2021-Q4	75,97	50 551 216	38401565
2022-Q4	79,98	50 886 122	40697440
2023-Q4	83,39	51 207 119	42703565

Los abonados internet banca ancha móvil no tienen una tendencia, sino más bien un promedio presentado a continuación

Tabla 2-7. Promedio abonados móviles

<u>Año</u>	<u>Abonados móviles</u>	<u>% penetración</u>
2013	15974162	0,337
2014	14814467	0,31
2015	10277809	0,213
2016	13033155	0,268
2017	13119857	0,267
2018	14928226	0,302
Promedio		0,283

2.2. Estimación de las velocidades de internet de banda ancha fijo y móvil a 2023.

Para estimar la futura demanda de capacidad de ancho de banda, algunos modelos de pronóstico [8] sugieren emplear alguna variable que tenga alguna tendencia definida para el mediano y largo plazo, y que esté directamente relacionada con la cantidad de información que se transmita a través de la red. La tendencia de evolución de velocidad de los módems y equipos terminales y su proceso de adopción por parte de los usuarios, parece aportar una idea aproximada de esta estimación.

Para el caso de Colombia, los datos se tomaron de los informes sectoriales periódicos dados por MINTIC. Los datos se toman a partir de 2014 hasta el primer trimestre de 2018, último informe publicado [13].

2.2.1. Evolución de la penetración de las velocidades para suscriptores de internet fijo y móvil, y abonados de internet móvil.

El proceso de adopción de módems y equipos terminales corresponde a un producto tecnológico que tiene diferentes generaciones. En este proceso se observa que una generación nueva supera a la anterior en su desempeño, que en el caso particular de los módems, se refiere particularmente a la velocidad de transmisión. Esta característica hace que la nueva generación no solo gane un mercado potencial más amplio por satisfacer requerimientos de ancho de banda mayor, debido al desarrollo de nuevas aplicaciones, sino que hace atractivo a los poseedores de antiguas generaciones, pasarse a la nueva. Este comportamiento puede verse claramente en la Figura 2-3:

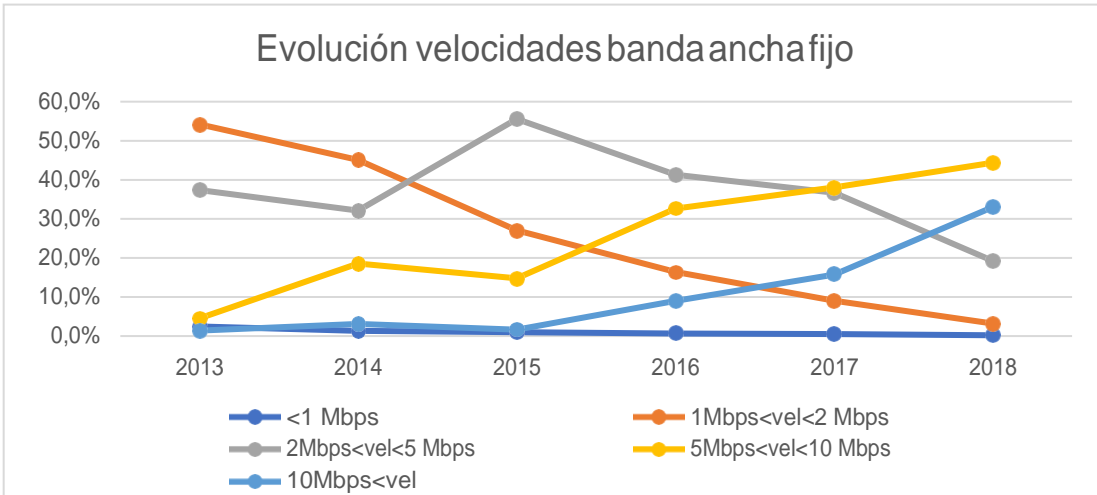


Figura 2-3. Evolución velocidades banda ancha fijo.

Dado lo anterior a continuación se presenta el comportamiento de ambos tipos de usuarios.

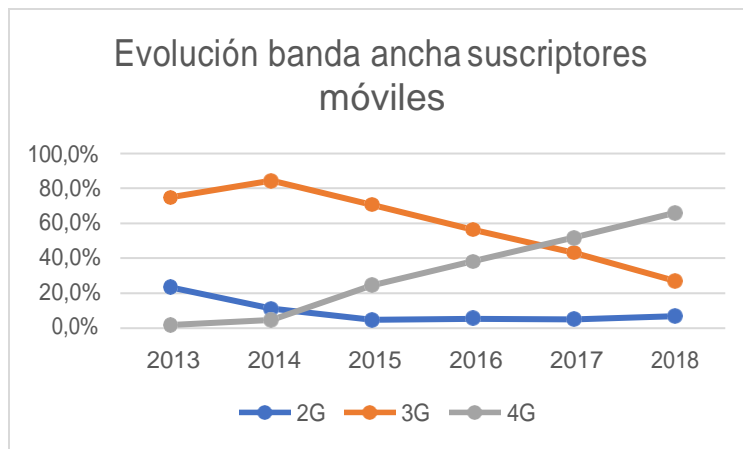


Figura 2-4. Evolución porcentual banda ancha suscriptores móviles

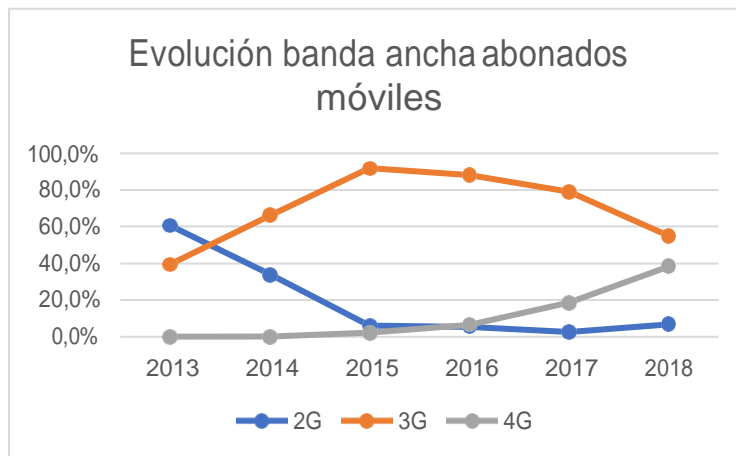


Figura 2-5. Evolución porcentual banda ancha abonados móviles

Estudios previos muestran que la ruta probable que parece seguirá la industria de los módems, es introducir módems con velocidades entre 1,5 Mbps a 100 Mbps [14], [15], [16], [17], [18], [19]. Para un horizonte a 5 años, este parece ser un límite probable. Para sensibilizar la cantidad frente al ingreso de los módems al mercado, se ha asumido los siguientes valores de velocidades: 20 Mbps, 50 Mbps y 100 Mbps, es decir aproximadamente duplicando la capacidad de una generación a otra. Este trabajo se centrará solo en la bajada, considerando que sigue teniendo mayor velocidad en sentido directo y por tanto una mayor exigencia a la red. Lo importante a resaltar es que estas proporciones pueden aplicarse a segmentos de un operador, pues se basa en datos de un mercado amplio.

2.3. Estimación de las velocidades de penetración de internet banda ancha.

Para esta estimación se hicieron las siguientes consideraciones.

- El período de tiempo del análisis va desde el año 2018 al año 2023.
- Se aplicará la siguiente operación, para cada tecnología:

$$B_{\text{prom}} = \frac{\sum_{i=1}^n B_i \cdot V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (2-5)$$

Donde B_{prom} es el ancho de banda en Mbps en el tiempo t , $\sum_{i=1}^n V_i$ es la velocidad ponderada de las distintas generaciones de módems i en el año t .

La expresión 3-5 proporciona un ancho de banda promedio para el área que se está estudiando, y proporciona un techo de la capacidad que tendría que tener la red para llevar a cabo la conexión de los usuarios a esa velocidad promedio.

La estimación se hizo con base en la observación de la tendencia señalada por los datos recopilados en cuanto al pico del porcentaje y el comportamiento de la adopción.

Estimación velocidad internet fijo

Tabla 2-8. Estimación velocidad internet fijo (Porcentaje)

Año	<u>2Mb/s- 5Mb/s %</u>	<u>5Mb/s- 10Mb/s%</u>	<u>10Mb/s- 20Mb/s %</u>	<u>20Mb/s- 50Mb/s %</u>	<u>50Mb/s- 100Mb/s %</u>
2019	9	52	36	4	
2020	6	44	42	8	
2021	3	36	47	12	1
2022	1	16	53	28	2
2023	0	4	43	45	8

Tabla 2-9. Estimación velocidad internet fijo (Capacidad)

Año	Pronóstico suscripciones a internet	2Mb/s-5Mb/s	5Mb/s-10Mb/s	10Mb/s-20Mb/s	20Mb/s-50Mb/s	50Mb/s-100Mb/s	Pronóstico de capacidad sus bps
2019	6943176	6,25E+13	7,22E+14	1,25E+15	2,78E+14	0	2,31E+15
2020	7186693	4,31E+13	6,32E+14	1,51E+15	5,75E+14	0	2,76E+15
2021	7396522	2,22E+13	5,33E+14	1,74E+15	8,88E+14	1,48E+14	3,33E+15
2022	7577291	7,58E+12	2,42E+14	2,01E+15	2,12E+15	3,03E+14	4,68E+15
2023	7733365	0	6,19E+13	1,66E+15	3,48E+15	1,24E+15	6,44E+15

Estimación velocidad internet suscriptores móvil

Tabla 2-10. Pronóstico penetración velocidad suscriptores móviles.

Año	2G	3G	4G	5G
2019	0,08	0,2	0,72	0
2020	0,06	0,14	0,79	0,01
2021	0,03	0,09	0,86	0,02
2022	0,02	0,06	0,84	0,08
2023	0	0,03	0,76	0,21

Tabla 2-11. Pronóstico de capacidad suscriptores móviles

Año	# suscriptores	2G	3G	4G	5G	Pronóstico
2019	32871518	6,73E+11	3,29E+13	4,73E+14	0	5,07E+14
2020	35795667	5,5E+11	2,51E+13	5,66E+14	3,58E+13	6,27E+14
2021	38401565	2,95E+11	1,73E+13	6,61E+14	7,68E+13	7,55E+14
2022	40697440	2,08E+11	1,22E+13	6,84E+14	3,26E+14	1,02E+15
2023	42703565	0	6,41E+12	6,49E+14	8,97E+14	1,55E+15

Estimación velocidad internet abonados móvil

Tabla 2-12. Pronóstico penetración velocidad abonado móvil

Año	2G	3G	4G	5G
2019	0,04	0,5	0,46	0
2020	0,02	0,46	0,52	0
2021	0,01	0,4	0,58	0,01
2022	0,01	0,32	0,65	0,02
2023	0	0,22	0,72	0,06

Cuando se analizan los datos de estos abonados respecto a la población total se nota que oscila alrededor del 28,3%. Esto explica por qué el informe del MINTIC no hace una estimación de su porcentaje de penetración. Este porcentaje se usó para estimar el número anual de este tipo de suscriptores.

Tabla 2-13. Pronóstico de capacidad abonados móviles

Año	# abonados en media 28,3 %	2G	3G	4G	5G	Pronóstico de capacidad abonados bps
2019	13995524	1,43E+11	3,5E+13	1,29E+14		1,64E+14
2020	14103281	7,22E+10	3,24E+13	1,47E+14	0	1,79E+14
2021	14206863	3,64E+10	2,84E+13	1,65E+14	1,42E+13	2,07E+14
2022	14305994	3,66E+10	2,29E+13	1,86E+14	2,86E+13	2,38E+14
2023	14400773	0	1,58E+13	2,07E+14	8,64E+13	3,1E+14

Tabla 2-14. Consolidado de las tres estimaciones de capacidad en bps, por tipo de usuario y su consolidado

Consolidado capacidad bps	Fijo	Suscriptores móvil	Abonados móvil	Total bps
2019	2,31E+15	5,07E+14	1,64E+14	2,98E+15
2020	2,76E+15	6,27E+14	1,79E+14	3,57E+15
2021	3,33E+15	7,55E+14	2,07E+14	4,29E+15
2022	4,68E+15	1,02E+15	2,38E+14	5,94E+15
2023	6,44E+15	1,55E+15	3,1E+14	8,3E+15

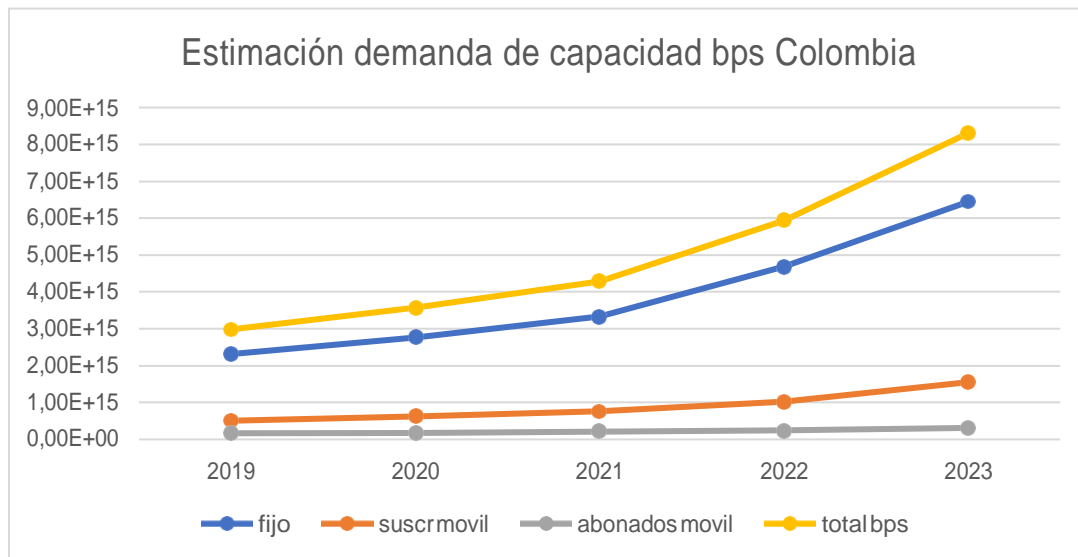


Figura 2-6. Estimación demanda de capacidad bps Colombia.

De la Figura 2-6 es posible notar que con la estimación presentada, se espera que la demanda de capacidad se triplique en los próximos 5 años. Aunque esta es una demanda agregada del país, es un punto de partida para prever la velocidad y la magnitud del crecimiento de la demanda de capacidad y que justifica un análisis de aumento de capacidad en las redes de los operadores.

Esta estimación se basa en que la tendencia actual continuará en los próximos 5 años. Factores externos como flujos migratorios podrían variar este pronóstico, incluso al alza.

Resumen

Este capítulo presenta la estimación de demanda de capacidad basado en predicciones de penetración, número de usuarios de los próximos cinco años usando estadísticas de la OECD y MinTIC y considerando las velocidades estimadas de los próximos cinco años en conexiones de banda ancha fija y móvil para tecnologías 2G, 3G y 4G. Los resultados obtenidos muestra un aumento en las tasas de bit por usuario para tecnologías de acceso, lo que dará como resultado una necesidad en el aumento de capacidad en las redes metropolitanas y de agregación y la necesidad de un cambio tecnológico hacia arquitecturas WDM para el backhaul móvil, ya que se estima que para sistemas 5G el requerimiento de ancho de banda por nodo móvil sea de 10Gb/s. Por otro lado, el aumento de velocidad por usuario impactará en gran medida la capacidad agregada requerida a nivel nacional, como se muestra en la Figura 2-6, lo que justifica la necesidad de buscar redes con mayor capacidad agregada por par de hilos de fibra, adaptando las redes actuales para soportar canales de más de 100Gb/s y optimizando el uso espectral de la fibra con arquitecturas *flexgrid*.

3. Estudio de Tecnologías

Para cumplir con los requerimientos de ancho de banda pronosticados para los próximos años, los operadores deben buscar tecnologías escalables en ancho de banda que les permita aumentar la capacidad de su red usando la cantidad mínima de recursos físicos. En este capítulo se presenta las características principales de la tecnología DWDM, como su medio de transmisión, ventanas de operación, componentes principales y arquitecturas de transporte. Por otro lado, se presenta el protocolo OTN, el cual permite a los operadores tener redes agnósticas al protocolo de transporte, permitiendo abordar diferentes segmentos de mercado como redes de acceso corporativo, interconexión de *data centers*, *backhaul* de redes móviles y transporte de capacidad con la misma infraestructura de red.

Complementariamente a este capítulo, los capítulos 4 y 5 presentan los parámetros de diseño de redes de transporte relevantes para determinar la capacidad final de la red dados sus parámetros y limitaciones físicas y las arquitecturas y requerimientos de las redes móviles de próxima generación y de las redes de interconexión de *data centers*.

3.1. DWDM

Con el fin de satisfacer la creciente demanda de ancho de banda, disminuir costos y gastos de operación y mantener bajos tiempos de implementación, se hace necesario utilizar técnicas que permitan enviar múltiples flujos de información por un medio físico compartido, las cuales se conocen como técnicas de multiplexación.

En la Figura 3-1 a) N flujos de información de tasa B b/s son unidos en un flujo de tasa total $N \times B$ b/s que es transmitido por el mismo medio físico. Esta técnica de multiplexación se conoce como multiplexación por división de tiempo (TDM), la cual permite agregar gran cantidad de señales de baja capacidad de forma económica, sin embargo, está limitada por la tasa de bit total del transmisor.

En la Figura 3-1 b) N flujos de información de tasa B b/s se agregan en el mismo medio físico de manera simultánea pero usando frecuencias o longitudes de onda diferentes para cada flujo. Este método se conoce como multiplexación por división de longitud de onda (WDM) [20].

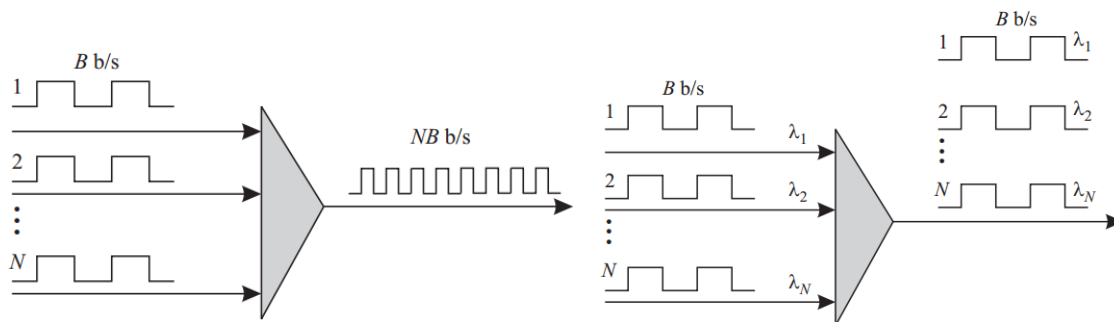


Figura 3-1. Técnicas de multiplexación en el tiempo y en frecuencia o longitud de onda.

Medio de transmisión

Con el fin de cumplir los requerimientos de capacidad, latencias y alcance de los sistemas de comunicaciones actuales y futuros, la fibra óptica se presenta como el medio de transmisión ideal debido a su baja atenuación y su gran ancho de banda disponible.

De modo sucinto, las fibras ópticas se pueden dividir en dos grandes tipos de acuerdo con el ancho de su núcleo, las fibras multi-modo y las fibras mono-modo.

De acuerdo a los tipos de fibra óptica y la disponibilidad de fuentes de luz, se definieron tres ventanas de transmisión según la Figura 3-2, la primera ventana se encuentra en la banda de 850 nm y es adecuada para fibras multi-modo, la ventana 2 y 3 se usan en fibras mono-modo. Por otro lado, se definieron seis bandas de transmisión, presentadas en la Tabla 3-1, donde debido a la disponibilidad de amplificadores EDFA, los sistemas de alta capacidad y larga distancia son operados en las banda C y L.

Las fibras multi-modo trabajan en la región de 850 nm y presentan un núcleo más ancho que permite la propagación del haz de luz por la fibra a través de diversos modos guiados, lo cual da como resultado que una señal de información puede tomar distintos caminos dentro de la fibra, causando que los diferentes componentes espectrales del pulso viajen con tiempos diferentes, dando lugar al ensanchamiento del pulso a medida que se propaga por la fibra, lo cual es conocido como dispersión intermodal, limitando la cantidad de información y la distancia que puede ser transmitida por este tipo de medio.

La fibra mono-modo opera en las regiones de 1310 nm y 1550 nm, posee un núcleo más estrecho, que solo permite a la luz propagarse a través de una única ruta, eliminando la dispersión intermodal. Por esta razón, la fibra óptica mono-modo es el medio de transmisión seleccionado para enlaces de larga distancia y alta capacidad, mientras que la fibra multi-modo se usa para conexiones de corto alcance debido a su limitación en dispersión, pero con la ventaja de su bajo costo.

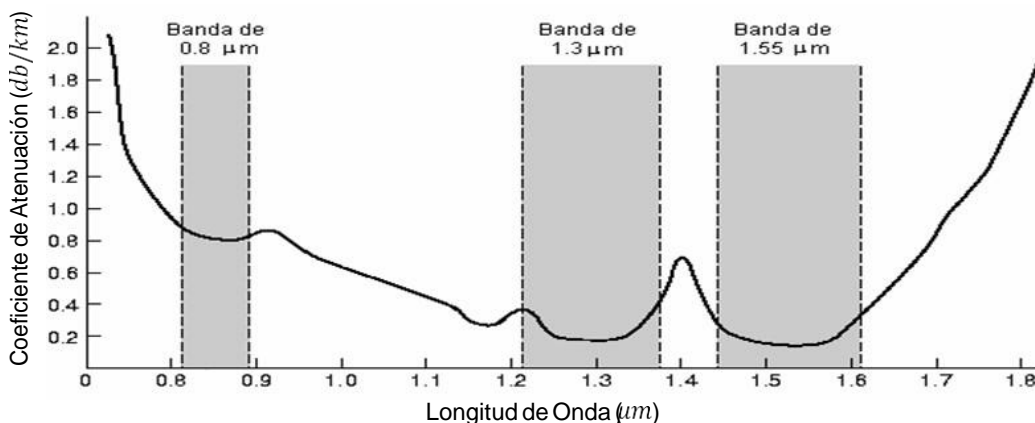


Figura 3-2. Ventanas de Transmisión fibra óptica. Tomada de [21]

Tabla 3-1. Descripción de las bandas de transmisión de la fibra óptica

Banda	Descripción	Rango de longitud de onda (nm)
Banda O	Original	1260 – 1360
Banda E	Extendida	1360 – 1460
Banda S	Corta	1460 – 1530
Banda C	Convencional	1530 – 1565
Banda L	Larga	1565 – 1625
Banda U	Ultra Larga	1625 – 1675

Tabla adaptada de la referencia [20]

En las referencias [20], [22] y [23] se presentan en forma detallada los parámetros físicos y la forma como la luz se propaga en la fibra óptica. Sin embargo, este trabajo se enfoca en estudiar los parámetros relevantes en el diseño de los sistemas de comunicación óptica como atenuación y dispersión cromática para las fibras comerciales en las bandas de operación (1310nm y 1550nm) siguiendo las recomendaciones de la ITU-T G.652 [24], G.653 [25] y G.655 [26].

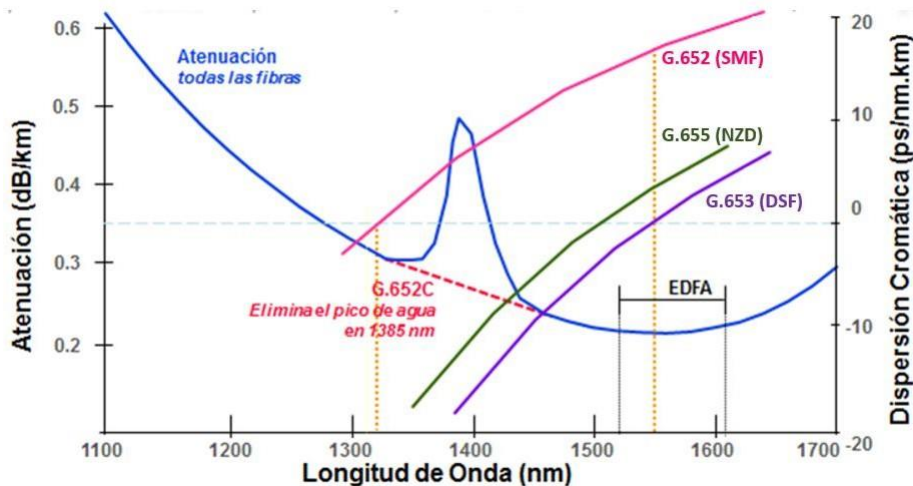


Figura 3-3. Características Fibras Ópticas Momo-Modo. Tomado de [21]

La primera fibra óptica usada en sistemas de comunicación de larga distancia fue la G.652, la cual presenta una atenuación máxima de 0.35 dB/km en la banda de 1550 nm (este valor es el máximo permitido por norma, sin embargo, fibras comerciales que siguen esta norma tienen atenuaciones del orden de 0.22 dB/km) y una dispersión cromática que puede ser calculada con las siguientes ecuaciones, las cuales dependen de la longitud de onda y de los parámetros presentados en la Tabla 3-2.

Para el caso de la fibra G.652B, la dispersión para una longitud de onda determinada depende de la longitud de onda mínima de cero dispersión (λ_0 nm) y la máxima pendiente en el punto de cero dispersión (λ_0 nm):

$$\alpha(\lambda) \leq \frac{\alpha_0(\lambda)}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \right] \quad (3-1)$$

Para el caso de la fibra G.652D, la dispersión cromática depende de los valores usados para la fibra G.652B y de la longitud de onda máxima de cero dispersión (λ_0) y la mínima pendiente en el punto de cero dispersión (α_0):

Para una longitud de onda en el rango de 1260nm a 1460nm, se usan las relaciones:

$$\frac{\alpha_0(\lambda)}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \right] \leq \alpha(\lambda) \leq \frac{\alpha_0(\lambda)}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \right], \alpha_0(\lambda) \leq \alpha_0 \quad (3-2)$$

$$\frac{\alpha_0(\lambda)}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \right] \leq \alpha(\lambda) \leq \frac{\alpha_0(\lambda)}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \right], \alpha_0(\lambda) \leq \alpha \leq \alpha_0 \quad (3-3)$$

$$\frac{\alpha_0(\lambda)}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \right] \leq \alpha(\lambda) \leq \frac{\alpha_0(\lambda)}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^4 \right], \alpha_0(\lambda) \leq \alpha \quad (3-4)$$

Para longitudes de onda desde 1460nm a 1625nm, se usa la desigualdad:

$$8.625 + 0.052(\lambda - 1460) \leq \alpha(\lambda) \leq 12.472 + 0.068(\lambda - 1460) \quad (3-5)$$

Tabla 3-2. Resumen recomendación ITU-T G.652.

Parámetro	G.652 B	G.652 D
$\alpha_0(\lambda)$	125	125
$\lambda_0(\lambda)$	1300	1300
$\lambda_0(\lambda)$	1324	1324
$\alpha_0 \left(\frac{\lambda_0}{\lambda^2} \right)$	0,092	0,092
$\alpha_0 \left(\frac{\lambda_0}{\lambda^2} \right)$	-	0,073
At. C @ 1310nm (dB/Km)	0,4	0,4
At. C @ 1550nm (dB/Km)	0,35	0,3
Max PMD $\left(\frac{\lambda_0}{\sqrt{\lambda_0}} \right)$	0,2	0,2

Nota: Los valores reales pueden cambiar. Se recomienda consultar hojas de datos de fabricantes para obtener los parámetros de diseño. Tomada de [24]

Debido a la aparición de los amplificadores EDFA, los cuales trabajan en banda C y L, las longitudes de onda cercanas a 1550nm fueron utilizadas para los sistemas de comunicación de larga distancia siguiendo el estándar ITU-T G.694.1 [27].

Para una longitud de onda de 1550nm, la dispersión cromática es del orden de 17 ps/nm/km , por lo tanto, en el momento en que los sistemas de comunicaciones ópticas que usaban fibra G.652 aumentaron su tasa de transmisión a 10Gb/s, la dispersión cromática se presentó como una limitación importante, ya que los receptores comerciales normalmente soportan dispersiones del orden de 1600 ps/nm , por lo que enlaces de más de 94km que usaban fibra estándar debían ser regenerados.

En este punto se tenían dos alternativas, usar compensadores de dispersión cromática los que a su vez presentaba pérdidas de inserción importantes, o buscar fibras ópticas con menor dispersión en la región de 1550nm, donde se desarrolla la fibra G.653, también conocida como DSF (*Dispersion Shift Fiber*), la cual presenta una dispersión cromática cercana a cero en la región de 1550nm.

La dispersión cromática para la fibra G.653A tiene un valor máximo en la región entre la longitud de cero dispersión mínima ($\lambda_{0 \text{ min}}$) y máxima ($\lambda_{0 \text{ max}}$) dada por la relación:

$$D(\lambda) \leq 3.5 \text{ para } \lambda_{0 \text{ min}} \leq \lambda \leq \lambda_{0 \text{ max}} \quad (3-6)$$

En el caso de la G.653B, se usan las relaciones para el cálculo de la dispersión cromática para longitudes de onda entre 1460nm y 1625nm.

$$D(\lambda) = 0,085 * (\lambda - 1525) - 3,5 \text{ para } 1460 \leq \lambda \leq 1525 \quad (3-7)$$

$$D(\lambda) = \frac{3.5}{75} * (\lambda - 1600) \text{ para } 1525 \leq \lambda \leq 1625 \quad (3-8)$$

$$D(\lambda) = \frac{3.5}{75} * (\lambda - 1500) \text{ para } 1460 \leq \lambda \leq 1575 \quad (3-9)$$

$$D(\lambda) = 0,085 * (\lambda - 1575) + 3,5 \text{ para } 1575 \leq \lambda \leq 1625 \quad (3-10)$$

Los principales parámetros de las fibras G.653A y G.653B son presentados a continuación en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3. Resumen recomendación ITU-T G.653.

Parámetro	G.653 A	G.653 B
λ_0	125	125
λ_0 (nm)		
λ_{0max} (nm)	1500	-
λ_{0min} (nm)	1600	-
λ_0 (nm)	0,085	-
λ_0 (nm)		
At. C @ 1550nm (dB/Km)	0,35	0,35
Max PMD ($\frac{\text{ps}}{\sqrt{\text{km}}}$)	0,5	0,2

Nota: Los valores reales pueden cambiar. Se recomienda consultar hojas de datos de fabricantes para obtener los parámetros de diseño. Tomada de [25]

La fibra óptica de dispersión desplazada (G.653) solucionó la limitación de dispersión cromática para sistemas mono canal de 10Gb/s, sin embargo, debido a la siempre creciente demanda de capacidad en las redes de transporte, fue adoptada la tecnología WDM para aumentar la capacidad de las redes al usar múltiples señales con diferentes longitudes de onda acopladas en el mismo par de hilos de fibra óptica.

Al momento de implementar este tipo de sistemas usando fibra G.653, los sistemas fueron penalizados por un efecto no lineal llamado mezcla de cuatro ondas (FWM, *Four Wave Mixing*), el cual es notorio en longitudes de onda cercanas a la longitud de onda de cero dispersión, la cual es del orden de 1550nm en la fibra G.653. Debido a las grandes ventajas que presentaba la tecnología DWDM y al no lograr realizar una compensación de los efectos no lineales de manera costo-efectiva, fue necesario desarrollar una fibra óptica con características nuevas, donde la longitud de onda de cero dispersión estuviera alejada de 1550nm como en la fibra G.653 y tuviera un coeficiente de dispersión cromática en 1550nm menor que el presentado en la fibra G.652, de esta forma es desarrollada la fibra G.655 o también conocida como NZDSF (*Non Zero Dispersion Shift Fiber*).

Para calcular la dispersión cromática para la fibra G.655C, la cual define la dispersión cromática entre 1530nm y 1565nm se usan las ecuaciones:

$$\lambda_0 \geq 1, \lambda_0 \leq 10 \tag{3-11}$$

$$\lambda_0 \leq \lambda_0 + 5 \text{ nm} \quad 1530 < \lambda < 1565 \tag{3-12}$$

Para la fibra G.655D, se caracteriza el parámetro de dispersión cromática para longitudes de onda entre 1460nm y 1625nm con las ecuaciones:

$$\lambda_0(\lambda) = \frac{7}{90} * (\lambda - 1460) - 4,20 \text{ nm} \quad 1460 \leq \lambda \leq 1550 \tag{3-13}$$

$$D_{\lambda}(\lambda) = \frac{2.97}{75} * (\lambda - 1550) + 2,80 \quad 1550 \leq \lambda \leq 1625 \quad (3-14)$$

$$D_{\lambda}(\lambda) = \frac{2.91}{90} * (\lambda - 1460) + 3,29 \quad 1460 \leq \lambda \leq 1550 \quad (3-15)$$

$$D_{\lambda}(\lambda) = \frac{5.06}{75} * (\lambda - 1550) + 6,20 \quad 1550 \leq \lambda \leq 1625 \quad (3-16)$$

Para la fibra G.655E, al igual que le fibra G.655D se caracteriza el parámetro de dispersión cromática para longitudes de onda entre 1460nm y 1625nm con las relaciones:

$$D_{\lambda}(\lambda) = \frac{5.42}{90} * (\lambda - 1460) + 0.64 \quad 1460 \leq \lambda \leq 1550 \quad (3-17)$$

$$D_{\lambda}(\lambda) = \frac{3.30}{75} * (\lambda - 1550) + 6.06 \quad 1550 \leq \lambda \leq 1625 \quad (3-18)$$

$$D_{\lambda}(\lambda) = \frac{4.65}{90} * (\lambda - 1460) + 4.66 \quad 1460 \leq \lambda \leq 1550 \quad (3-19)$$

$$D_{\lambda}(\lambda) = \frac{4.12}{75} * (\lambda - 1550) + 9.31 \quad 1550 \leq \lambda \leq 1625 \quad (3-20)$$

Los principales parámetros de las fibras G.655C/D/E son presentados a continuación en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4. Resumen recomendación ITU-T G.655.

Parámetro	G.655 C/D/E
$\lambda_{0max}(\lambda)$	125
<i>At. C @ 1550nm (dB/Km)</i>	0,35
<i>Max PMD</i> ($\frac{\mu s}{\sqrt{km}}$)	0,2

Nota: Los valores reales pueden cambiar. Se recomienda consultar hojas de datos de fabricantes para obtener los parámetros de diseño. Tomada de [26]

La fibra óptica G.655 se presentaba como el medio de transmisión más adecuado para sistemas DWDM (al tener dispersión diferente de cero en la banda de 1550nm, minimizando el efecto no lineal FWM presentado en las fibras G.653) de largo alcance (al tener una dispersión cromática menor comparada con la fibra estándar G.652).

Sin embargo, al momento de evolucionar la tasa de bit de 10Gb/s a 40/100Gb/s, la fibra G.655 presenta una mayor afectación por efectos no lineales como SPM y XPM ya que tiene un área afectiva menor que la fibra G.652.

Por otro lado, para la transmisión de tasas de bit mayores a 10Gb/s, se usan formatos de modulación en fase y cuadratura, por lo que fue necesario la implementación de receptores coherentes que tienen una mayor complejidad pues permiten, al detectar la fase de la señal, medir y compensar efectos lineales en la fibra, como dispersión cromática y dispersión por modo de polarización.

Por lo tanto, los efectos no lineales se convirtieron en el factor de degradación más significativo en los sistemas de transmisión óptica para tasas mayores a 10Gb/s. Por las razones presentadas anteriormente, la fibra óptica estándar G.652 es el medio de transmisión para garantizar el correcto funcionamiento de un sistema DWDM con tasas de bit mayor o igual a 10Gb/s.

Componentes

Las funciones principales de un sistema DWDM son:

- Agrupar múltiples señales en un mismo par de hilos de fibra
- Sintonizar los diferentes canales en longitudes de onda adecuadas
- Amplificar la señal para lograr distancias mayores
- Agregar y desagregar tráfico

Para cumplir con estas funciones, se presentan a continuación los elementos principales que hacen posible un sistema DWDM. En la Tabla 3-4 se resumen las características principales de estos dispositivos para el diseño de las redes de transporte analizadas en esta tesis. Estos valores se tomaron de diferentes páginas de proveedores, y una explicación de su función en la red, se detalla en los apartes siguientes de este capítulo.

Tabla 3-5. Parámetros de diseño componentes ópticos.

<u>Componente</u>	<u>Característica</u>	<u>Parámetro</u>	<u>Valor típico</u>
Multiplexor	8 Canales	Pérdida de Inserción	4 dB
Multiplexor	20 Canales	Pérdida de Inserción	5,5 dB
Multiplexor	40 Canales	Pérdida de Inserción	7 dB
Multiplexor	80 Canales	Pérdida de Inserción	7 dB
Transmisor	10Gb/s OOK	Pout	0dBm
Transmisor	10Gb/s OOK	Sensibilidad	-18dBm
Transmisor	10Gb/s OOK	Tolerancia Dispersión Cromática	1600 ps/nm
Transmisor	10Gb/s OOK	Tolerancia OSNR	14dB
Transmisor	100Gb/s DP-QPSK	Pout	0dBm
Transmisor	100Gb/s DP-QPSK	Sensibilidad	-18dBm
Transmisor	100Gb/s DP-QPSK	Tolerancia DC	40 ns/nm
Transmisor	100Gb/s DP-QPSK	Tolerancia OSNR	12.5dB
Amplificador	EDFA	Pot. Salida por canal 10Gb/s	5dBm
Amplificador	EDFA	Pot. Salida por canal 100Gb/s	2dBm
Amplificador	EDFA	NF	5-6dB
Amplificador	EDFA	Pot. Salida Total	18-24dBm
Amplificador	EDFA	Sensibilidad	-25dBm
Amplificador	Raman	Ganancia Raman 28dBm	7dB
Amplificador	Raman	Ganancia Raman 30dBm	12dB

DCFM	84 ps/nm	Pérdida de Inserción	1,5dB
DCFM	167 ps/nm	Pérdida de Inserción	2dB
DCFM	335 ps/nm	Pérdida de Inserción	2,5dB
DCFM	669 ps/nm	Pérdida de Inserción	3,5dB
DCFM	1339 ps/nm	Pérdida de Inserción	6,5dB
OADM	2 Canales	Pérdida de Inserción Add/Drop	3dB
OADM	2 Canales	Pérdida de Inserción Express	2,5dB
OADM	4 Canales	Pérdida de Inserción Add/Drop	4dB
OADM	4 Canales	Pérdida de Inserción Express	2,5dB
OADM	8 Canales	Pérdida de Inserción Add/Drop	5dBm
OADM	8 Canales	Pérdida de Inserción Express	2,5dB
WSS	9 Grados B&S	Pérdida de Inserción In – Inter	10dB
WSS	9 Grados B&S	Pérdida de Inserción Inter – Out	10dB
WSS	9 Grados B&S	Pérdida de Inserción In – Drop	7dB
WSS	9 Grados B&S	Pérdida de Inserción ADD – Out	8dB

3.1.1. Multiplexores

La tecnología DWDM agrupa múltiples señales cada una con longitudes de onda diferentes en un par de hilos de fibra óptica para luego ser transmitidas a larga distancia. El elemento encargado de agregar las señales independientes en un medio común es llamado Multiplexor, mientras que el elemento encargado de desagregar la información en señales independientes se conoce como Demultiplexor.

Existen múltiples componentes capaces de realizar la agrupación de diferentes señales con longitudes de onda diferentes, entre los cuales se encuentran las rejillas de difracción, los arreglos de rejillas de *Bragg* (AWG), los filtros *Fabry Perot*, los interferómetros *Mach-zehnder* y los filtros acusto-ópticos [20]. Las principales características deseadas de un multiplexor óptico son el bajo costo, las bajas pérdidas de inserción, el bajo *crosstalk* entre canales, la independencia en las pérdidas y en el ancho de banda de paso ante cambios en la temperatura y el estado de polarización de la señal y la posibilidad de tener un alto número de canales en el dispositivo.

De acuerdo con las características deseadas ya mencionadas, los principales dispositivos y métodos usados para multiplexación en el dominio óptico son las siguientes:

Multiplexores basados en rejillas de difracción: Cuando un haz de luz poli-cromático impacta en una rejilla de difracción, cada longitud de onda es difractada en un ángulo diferente y por lo tanto en un punto diferente del espacio, para luego ser enfocadas en diferentes fibras con el uso de una lente como se muestra en la Figura 3-4. [23]

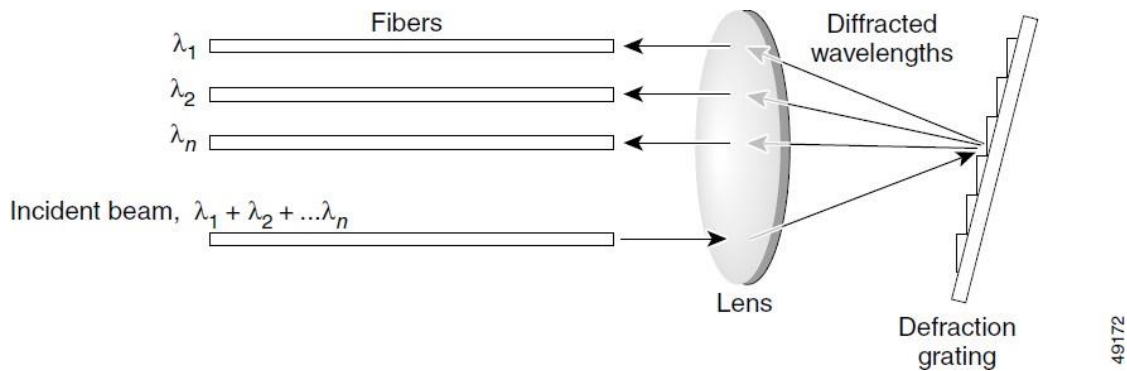


Figura 3-4. Multiplexores basados en rejillas de difracción. Tomada de [23]

Multiplexores basados en AWG: un AWG consiste en dos cavidades y un arreglo de guías de onda con una diferencia de longitud fija. Cuando la luz entra a la cavidad de entrada, es difractada hacia las diferentes guías de onda y debido a la diferencia de caminos, cada guía introduce un retraso en fase en la cavidad de salida, donde son acopladas múltiples fibras ópticas. Como resultado de este proceso, diferentes longitudes de onda presentan interferencia máxima en diferentes ubicaciones, donde se acoplan las fibras de salida para obtener cada longitud de onda en un puerto de salida diferente. [23]

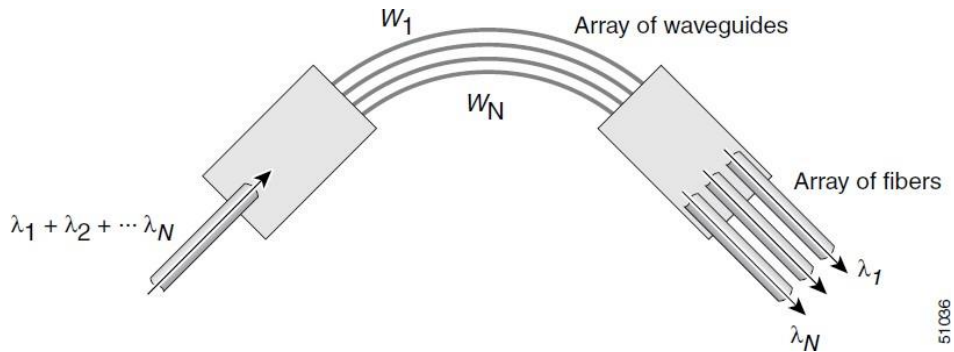


Figura 3-5. Multiplexores basados en AWG. Tomada de [23]

3.1.2. Amplificadores Ópticos

En las redes de comunicaciones ópticas los elementos como acopladores, moduladores, compensadores de dispersión presentan altas pérdidas de inserción (en el caso de los multiplexores, las pérdidas de inserción están del orden de 4dB (para sistemas de 8 canales) y hasta 7dB (para sistemas de 80 canales), adicionalmente los transmisores y receptores tienen limitaciones con respecto a la potencia de transmisión y recepción soportada, por lo tanto es necesario el uso de amplificadores ópticos para que las redes sean de alta capacidad y largo alcance.

En las redes ópticas de primera generación basadas en tecnologías como SDH y SONET, se hacía uso de regeneradores que consistían en conversores O/E/O para replicar la señal original hasta su nodo de destino. La separación entre los regeneradores depende del tipo

de fibra óptica y características ópticas de los transmisores y receptores según el estándar ITU-T G.957 [28].

Cuando se vio la necesidad de ampliar la capacidad final del sistema usando tecnología WDM para optimizar el uso del espectro óptico, al tener múltiples interfaces siendo transmitidas en paralelo, la cantidad de regeneradores, costo del sistema y tiempos de despliegue de las nuevas redes aumentaron de manera considerable. Adicionalmente, los regeneradores están diseñados para una tasa de bit y formato de modulación fijo, al momento de realizar ampliaciones del sistema era necesario cambiar tanto los equipos terminales como los regeneradores de toda la ruta.

Debido a las razones explicadas anteriormente, se vio la necesidad de tener elementos de red que amplificaran la señal en el dominio óptico sin ser necesario convertirlas al dominio eléctrico y que tuvieran un ancho de banda suficiente para soportar las bandas de operación de los sistemas WDM de la época. Por consiguiente, debido a que la fibra óptica tiene ventanas de baja atenuación en longitudes cercanas a 1310nm y 1550nm, las recomendaciones ITU-T G.652, G.653 y G.655 definen las bandas de operación de las fibras ópticas, siendo la banda C (1530 – 1565nm) la más adecuada para transmisión a larga distancia [26], [25], [24].

Los amplificadores ópticos permiten aumentar la capacidad de los sistemas de transmisión solo variando los elementos terminales ya que son agnósticos a la tasa de bit y formato de modulación, sin embargo, no son elementos perfectos, introducen ruido al sistema, el cual se acumula a medida que la señal pasa por cada amplificador presente en el sistema, por lo tanto los sistemas pasan de ser limitados por potencia a ser limitados por relación señal a ruido. Estos pueden ser clasificados en dos grandes familias, los amplificadores de fibra y los amplificadores basados en efectos no lineales [29].

Para los amplificadores de fibra, el fenómeno físico fundamental detrás de su funcionamiento es la emisión estimulada de radiación en presencia de un campo electromagnético. De acuerdo con los principios de la mecánica cuántica, un electrón puede encontrarse en un estado de energía discreto.

Si consideramos un electrón y dos de sus niveles de energía E_1 y E_2 , con $E_2 > E_1$ y un campo electromagnético en el cual su frecuencia cumpla la relación $h\nu = E_2 - E_1$, el campo induce transiciones de electrones entre los niveles de energía E_1 y E_2 . La transición $E_1 \rightarrow E_2$ produce una absorción de fotones del campo electromagnético, mientras que la transición $E_2 \rightarrow E_1$ produce emisión de fotones de energía $h\nu$. Por lo tanto, si la emisión estimulada domina sobre la absorción, lo que significa que el campo eléctrico incidente causa más transiciones $E_2 \rightarrow E_1$ que $E_1 \rightarrow E_2$, tendremos un incremento total en el número de fotones de energía $h\nu$ y una amplificación de la señal, en caso contrario, la señal será atenuada.

En la Figura 3-6 se muestran ambos procesos. La cantidad de transiciones de un estado a otro va a depender de la cantidad de átomos (población) que se encuentren en cada estado al momento de incidir el campo electromagnético. En equilibrio térmico los niveles de energía más bajos tienen mayor población, por lo tanto las poblaciones E_1 y E_2 , que corresponden a los estados de energía E_1 y E_2 cumplen la condición $E_2 < E_1$, por lo tanto en equilibrio térmico domina el fenómeno de absorción. Con el fin de amplificar la señal,

debemos invertir la relación entre las poblaciones de los niveles, lo que se conoce como inversión de población ($n_1 < n_2$) y esto puede ser logrado suministrando energía adicional al sistema en una forma adecuada con el fin de bombear los electrones hacia un nivel de energía superior.

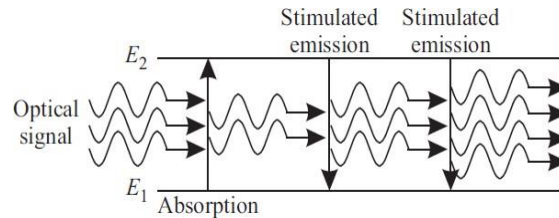


Figura 3-6. Emisión estimulada y absorción en un sistema atómico de dos niveles de energía. Tomada de [20]

La transición de electrones entre los diferentes niveles de energía no siempre se debe a radiaciones incidentes. El sistema presenta transiciones de niveles de mayor a niveles de menor energía de manera espontánea, generando fotones de energía $h\nu$ a una tasa de $1/\tau_{21}$, donde τ_{21} se conoce como tiempo de vida de emisión espontánea. A pesar de que el sistema emita de manera espontánea fotones de energía $h\nu$, los fotones son emitidos con una dirección, fase y polarización aleatoria (proceso incoherente), lo cual no sucede con los fotones generados por medio de emisión estimulada (proceso coherente). Los fotones generados por emisión espontánea son considerados a su vez como fotones incidentes, generando una amplificación de las emisiones espontáneas conocidas como ASE (*Amplified Spontaneous Emission*). La ASE aparece como ruido en la salida del amplificador debido a que existe incoherencia entre los fotones generados por emisión estimulada y los fotones generados por emisión espontánea [20].

Amplificadores EDFA

Con el fin de satisfacer los requerimientos de las redes de comunicación, los amplificadores deben tener anchos de banda de ganancia en longitudes de onda cercanas a 1550nm (longitud de onda de menor atenuación para fibras SMF). Los amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA) operan esta banda, presentando una ganancia relativamente plana en la banda C (1535nm – 1560nm).

Para entender el funcionamiento del amplificador EDFA debemos estudiar sus niveles de energía y transiciones asociadas para iones de erbio dopados en fibra de silicio. Según la Figura 3-7, la transición de átomos del nivel 1 al nivel 2 de energía se logra con bombeo en 1480nm, mientras que la transición del nivel 1 al nivel 3 se logra con bombeo en 980nm. En el mercado existen laser semiconductores que trabajan en estas longitudes de onda, sin embargo, al usar laser de bombeo en 980nm se obtiene una figura de ruido con desempeño superior comparado con los sistemas que usan bombeo en 1480nm. Independiente de la longitud de onda del láser de bombeo, la transición del nivel 2 al nivel 1 libera un fotón de energía $h\nu$ correspondiente a una longitud de onda entre 1520nm y 1570nm. Esta es una de las razones para seleccionar las fibras dopadas con erbio para el diseño de amplificadores ópticos [30].

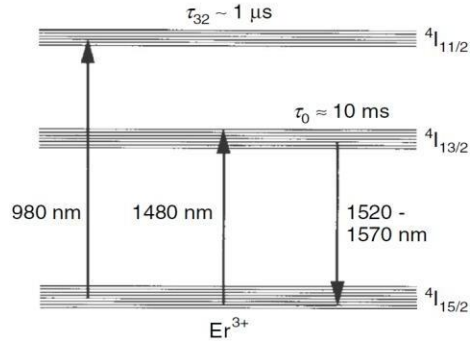


Figura 3-7. Diagrama de niveles de energía simplificador para un EDFA con bombeo cercano a 980nm. Tomado de [30].

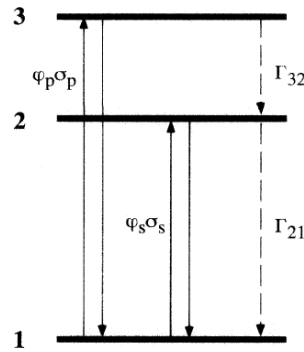


Figura 3-8. Sistema de 3 niveles usado para el modelo del amplificador. Tomada de [31].

Para analizar las características del amplificador EDFA con láser de bombeo en 980nm, podemos usar el modelo de tres niveles de la Figura 3-8. Las tasas de transición entre los niveles 1 a 3 son proporcionales a las poblaciones en los niveles y al producto entre el flujo de bombeo Φ_p y la sección transversal de bombeo σ_p . La tasa de transición entre los niveles 1 y 2 es proporcional a las poblaciones en los niveles y al producto de flujo de señal Φ_s y la sección transversal de la señal σ_s .

Por otro lado también se tendrán transiciones espontáneas entre los niveles superiores a los inferiores las cuales se presentan a una tasas de transición Γ_{32} y Γ_{21} . En el sistema de tres niveles, el nivel 1 se considera como el nivel de tierra, el nivel 2 es llamada nivel meta estable debido a que tiene un tiempo de vida mayor. Para el proceso de amplificación, el nivel 2 es el nivel de transición superior y el nivel 1 el nivel inferior. Las poblaciones de los niveles 1, 2 y 3 se representan con N_1 , N_2 y N_3 . Para que exista amplificación se debe presentar inversión de población entre los estados 1 y 2, lo que significa que por lo menos la mitad de los iones de erbio deben ser excitados al nivel 2, por lo tanto existe una potencia de bombeo umbral necesaria para el proceso de amplificación. Las ecuaciones de tasa de cambio de población pueden ser escritas como [31]:

$$\frac{dN_3}{dt} = -\Gamma_{32}N_3 + (N_1 - N_3)\Phi_p\sigma_p \quad (3-21)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\Gamma_{21}N_2 + \Gamma_{32}N_3 - (N_2 - N_1)\Phi_s\sigma_s \quad (3-22)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \Gamma_{21}N_2 - (N_1 - N_3)N_1 + (N_2 - N_1)N_1 \quad (3-23)$$

En estado estable, se cumple que

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = \frac{dN_3}{dt} = 0 \quad (3-24)$$

Y la población total está dada por:

$$N = N_1 + N_2 + N_3 \quad (3-25)$$

Usando las ecuaciones anteriores y teniendo en cuenta que la tasa de transición espontánea del nivel 3 al nivel 2 es mucho mayor comparado la cantidad de iones que llegan desde el nivel 1 por bombeo, se puede considerar un valor de N_3 cercano a cero. De esta forma se haya la siguiente relación:

$$N_2 - N_1 = \frac{N_1 N_2 - \Gamma_{21} N_1}{\Gamma_{21} + 2N_1 + N_2} \quad (3-26)$$

La condición para tener inversión de población y por lo tanto la condición umbral para la amplificación se presenta para $N_2 = N_1$, por lo tanto:

$$N_{th} = \frac{\Gamma_{21}}{N_1} \quad (3-27)$$

La intensidad de bombeo umbral para garantizar la amplificación está dada por $N_{th} = h \Gamma_{21} / N_1$ [31].

En el mercado es posible encontrar amplificadores EDFA para aplicaciones DWDM con potencias de salida máxima del orden de 18dBm a 24dBm, con ganancia configurable desde 10dB hasta 30dB y con figuras de ruido entre 5dB y 6dB.

Amplificadores RAMAN

Los amplificadores RAMAN, a diferencia de los tradicionales amplificadores EDFA, hacen uso de los efectos no lineales para obtener el efecto de amplificación. La ganancia Raman proviene de la transferencia de potencia desde una señal de mayor frecuencia hacia una señal de menor frecuencia dada por la energía de un fonón óptico. En la Figura 3-9 se muestra el coeficiente de ganancia Raman en fibra de silicio, el cual presenta un ancho de banda da ganancia de 40THz y un pico cercano a 13.2THz, lo que corresponde a un ancho de banda total de 320nm y un desplazamiento en longitud de onda de 105.71nm para una longitud de onda de 1550nm ($|N_1| = N_1^2 N_2$).

El efecto Raman es un efecto bidireccional, por lo tanto es posible utilizarlo en el mismo sentido de transmisión de la señal (amplificador en transmisión) o en el sentido contrario (amplificador en recepción), sin embargo, como la potencia de la señal se limita en transmisión para evitar efectos no lineales y la potencia decrece a medida que se propaga por la fibra óptica, este efecto es normalmente usado en recepción. La Figura 3-10 muestra la configuración del amplificador Raman para transmisión y recepción [32]

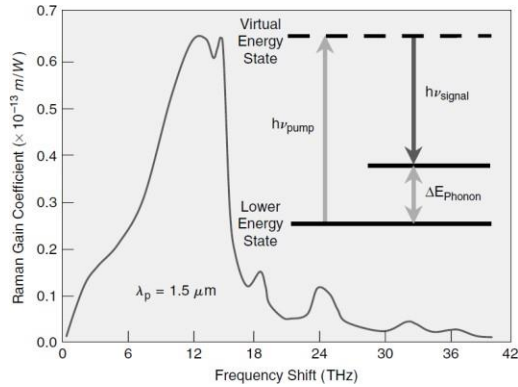


Figura 3-9 Curva de ganancia Raman en fibra de Silicio. Diagrama de nivel de energía del proceso Raman, el cual toma un fotón de mayor energía y lo divide en un fotón y un fonón de menor energía, Tomada de [33].

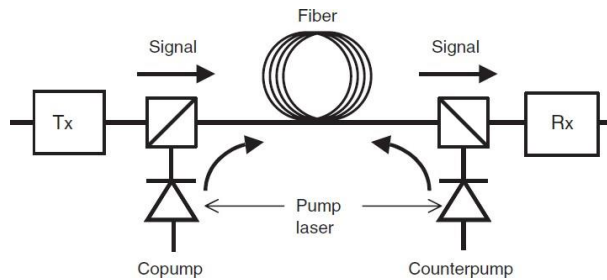


Figura 3-10 Configuración amplificador Raman. Tomada de [32].

Para el amplificador de la Figura 3-10, la interacción entre el bombeo y la señal está dada por las siguientes ecuaciones [33]:

$$\frac{dP_s}{dz} = -\alpha_s P_s - \alpha_p P_p + g R_s P_p \quad (3-28)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = -\alpha_p P_p - \alpha_s P_s + g R_p P_s \quad (3-29)$$

Los coeficientes de absorción α_s y α_p corresponden a las pérdidas de la señal y el bombeo en la fibra. Descartando el primer término de la parte derecha de la última ecuación, la relación entre la potencia de señal y la potencia de bombeo se puede escribir como:

$$P_s(z) = P_s(0) \exp\left(-\int_0^z (\alpha_s + \alpha_p) dz\right) \quad (3-30)$$

De acuerdo con la expresión anterior, se puede deducir la expresión de la ganancia del amplificador de la siguiente forma:

$$G = P_s(z)/P_s(0) = \exp\left(-\int_0^z (\alpha_s + \alpha_p) dz\right) \quad (3-31)$$

Donde

$L_{\text{eff}} = (1 - e^{-\alpha L})/\alpha$ Es la longitud efectiva de la fibra

$\frac{G}{P_{\text{pump}}}$ Es la eficiencia de la ganancia Raman

A_{eff} Es el área efectiva del bombeo

P_{pump} Es la potencia de bombeo

$P_{\text{sig}}(0)$ Es la potencia de la señal

El ancho de banda de ganancia del Raman es de más de 40THz, sin embargo, según la Figura 3-9, el coeficiente de ganancia tiene valores altos cerca de 13.2THz y en un ancho de banda más limitado, del orden de 3THz, por lo tanto, para el diseño de los sistemas ópticos basados en amplificadores Raman podemos considerar ancho de banda de amplificación de 25nm por cada laser de bombeo. Con el fin de aumentar el ancho de banda, se aumenta el número de bombeos como se muestra en la Figura 3-11 , logrando aumentar el ancho de banda total de 25 a 35nm. En la Figura 3-12 se muestra el espectro de ganancia plano entre 1530 y 1610nm (Banda C+L) usando 12 laser de bombeo. [33], [34].

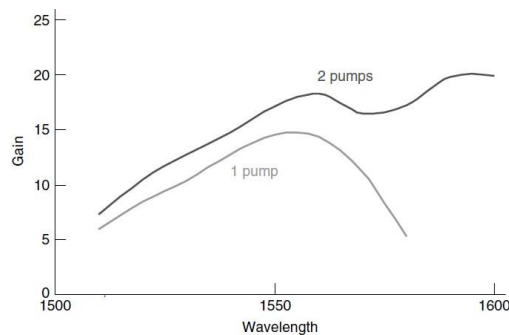


Figura 3-11 Espectro de ganancia Raman usando dos laser de bombeo. Tomada de [33], [34].

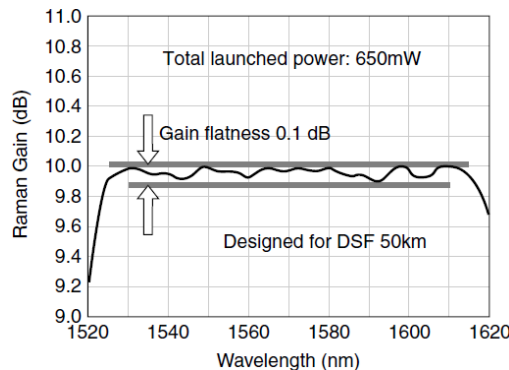


Figura 3-12. Espectro de ganancia Raman banda C+L usando 12 laser de bombeo. Tomada de [33], [34]

Amplificadores SOA

Los amplificadores ópticos basados en semiconductor son básicamente láseres semiconductores operando ligeramente arriba del umbral y con baja reflectividad en una de

las caras de la cavidad. Los SOA se pueden dividir en dos familias, los SOA basados en cavidad y los SOA TWA (*traveling wave amplifier*) [22].

Una de las desventajas de los SOA con respecto a los EDFA, es que la ganancia de los SOA depende del estado de polarización de la señal de entrada, lo cual no es conveniente para los sistemas de transmisión ópticos. Por otro lado, los amplificadores SOA presentan *cross-talk* entre canales, presentando otra limitante con respecto a los amplificadores basados en fibra dopada. Adicionalmente, los tiempos de vida de los iones en los amplificadores SOA es mucho menor que el caso de los EDFA, por lo tanto la ganancia cambia con respecto a la tasa de bit de la señal de entrada y presenta mayor emisión espontánea, por esta razón, introduce más ruido a la señal de entrada.

Debido a las razones anteriores, los amplificadores SOA no son adecuados para las redes de transporte óptico y no se explicará en detalle su funcionamiento. Se puede encontrar mayor detalle de este tipo de amplificadores en las referencias [20], [22].

3.1.3. Transmisores

Los transmisores ópticos son los elementos encargados de adaptar la señal de entrada para ser transmitida por un sistema WDM. Son los encargados de modular la señal de entrada en una longitud de onda adecuada para luego ser conectada al multiplexor óptico, siguiendo la recomendación ITU-T G.694.1 [27]. Los transmisores están compuestos por fuentes de luz y moduladores.

Las fuentes de luz pueden ser implementadas por diversos dispositivos como LED o Láseres y también son usadas como fuentes de bombeo en los amplificadores EDFA y Raman. Las características deseadas son potencias de salida altas, estabilidad, bajo ancho espectral, tolerancia a dispersión cromática.

Para entender el funcionamiento de un láser, este puede ser considerado como un amplificador dentro de una cavidad resonante. Si el amplificador, o medio de ganancia es ubicado entre dos placas reflectivas paralelas, en el momento en que la señal impacte la placa exterior, parte de la señal será transmitida mientras que la otra parte será reflejada hacia el dispositivo, donde se producirá una interferencia constructiva para las longitudes de onda resonantes dentro de la cavidad, lo que se conoce como modos longitudinales.

Si la combinación de la ganancia y la reflectividad de la placa son suficientes, el amplificador empezará a oscilar, o producir luz en la salida aun sin tener señal de entrada (punto conocido como límite de emisión). Debido a que la luz del amplificador proviene de emisión estimulada de radiación, es una luz coherente, por esta razón la luz proveniente de un láser también es coherente (la sigla laser significa *light amplification by stimulated emission of radiation*) [20].

El láser descrito en el párrafo anterior se conoce como laser *Fabry Perot* y oscilará de manera simultánea para longitudes de onda con separación $\Delta\lambda = \lambda/2nL$, donde L es la longitud de la cavidad y n es su índice de refracción, por lo tanto, este laser se conoce como laser de múltiples modos longitudinales (MLM) y su espectro es mostrado en la Figura 3-13a. Para sistemas WDM, es deseable que los láseres tengan el menor ancho espectral

posible, por lo tanto se busca que los dispositivos oscilen en un solo modo longitudinal, lo que se conoce como láseres SLM y su espectro se muestra en la Figura 3-13b.

Este tipo de dispositivos pueden ser construidos cambiando la cavidad resonante por una serie de reflectores estrechamente espaciados, donde la contribución de cada onda reflejada se suman en fase si el espaciamiento entre reflectores es múltiplo entero de la mitad del valor de la longitud de onda en la cavidad, lo cual se conoce como condición de *Bragg*. Por medio de este dispositivo es posible suprimir la mayoría de modos longitudinales para que el láser oscile en el modo fundamental que corresponde a una frecuencia del doble de la separación entre reflectores. Estos tipos de laser se conocen como DFB (*Distributed Feedback Lasers*) y también existen los DBR (*Distributed Bragg Reflector*) [20].

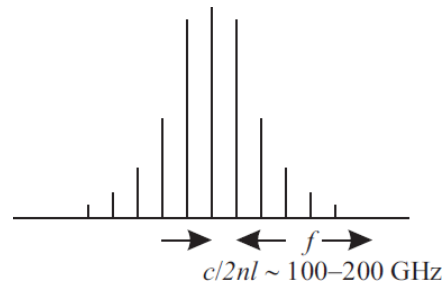


Figura 3-13. Espectro de salida de un laser MLM, Tomada de [20]

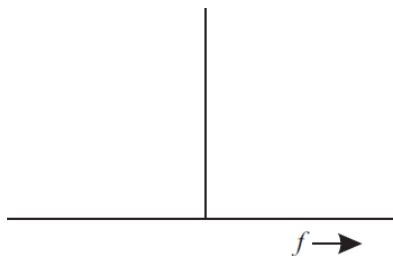


Figura 3-14. Espectro de salida de un laser SLM. Tomada de [20]

Luego de presentar los métodos de generación de fuentes de luz, es necesario cargar la señal de información en la portadora óptica para ser transmitida a larga distancia. Este proceso puede ser realizado mediante modulación directa o modulación externa. En la modulación directa, la señal binaria de información se toma como señal de alimentación del láser, por lo tanto cuando hay un “0” en la señal de información, el láser permanece apagado y cuando hay un “1” el láser esta encendido, método que disminuye el tiempo de vida del dispositivo al estar continuamente en transición entre los estados encendido y apagado y debido a que se genera un cambio instantáneo en la frecuencia de salida del láser, conocido como *chirp*, el cual conlleva a un ensanchamiento mayor del pulso al momento de ser propagado por la fibra. El esquema del modulador directo se ilustra en la Figura 3-15 [22].

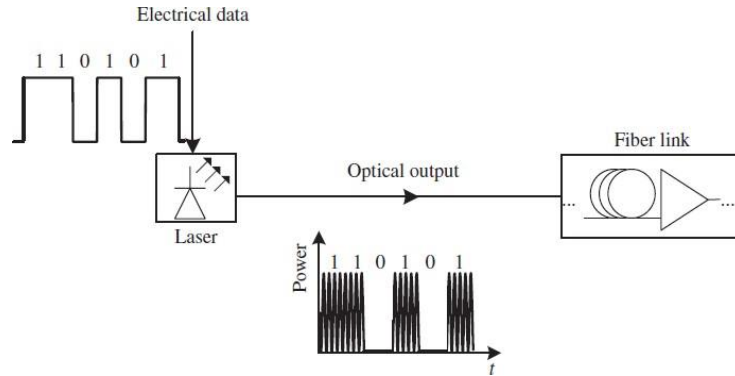


Figura 3-15. Modulación directa de un láser. Tomada de [22]

El esquema de modulación externa mantiene el láser oscilando de forma continua y carga la señal de información por medio de un elemento externo, el cual puede ser un modulador de fase, un interferómetro *Mach Zehnder* o un modulador de electro absorción [22]. Este método permite aumentar la tasa de bit de la señal de información con un *chirp* (oscilación en frecuencia) menor y sin afectar el tiempo de vida de la fuente de luz. El esquema es mostrado en la Figura 3-16.

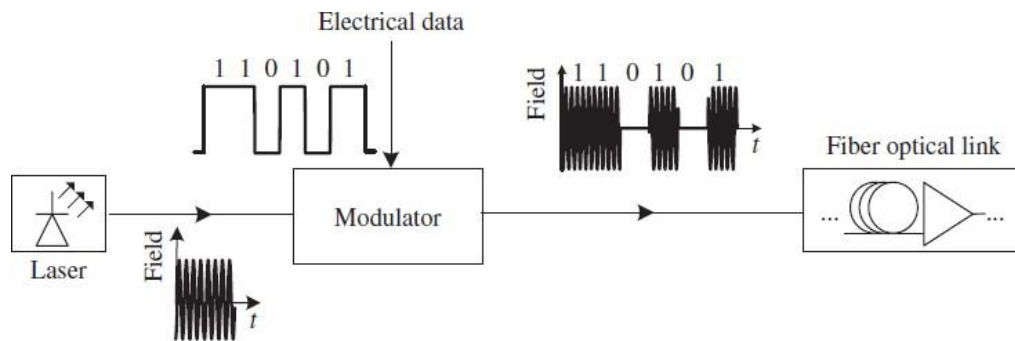


Figura 3-16. Transmisor basado en modulador externo. Tomada de [22].

3.1.4. Compensadores de Dispersión Cromática

Los compensadores de dispersión cromática son elementos claves en las redes de transporte diseñadas para tasas de bit de 10Gb/s, ya que para esta tasa de bit los receptores son basados en detección directa y no son capaces de detectar ni compensar los efectos lineales en la fibra óptica.

Existen dos tecnologías para la compensación de la dispersión cromática, los compensadores de dispersión basados en fibra y los compensadores de dispersión basados en rejillas de *Bragg* [20].

Los compensadores de dispersión cromática basados en fibra (DCFM) se diseñan con fibras ópticas cuya dispersión cromática en la región de 1550nm sea negativa. Para tener un enlace totalmente compensado se debe cumplir la siguiente relación:

$$\beta_1 \omega^2 + \beta_2 \omega^4 = 0 \quad (3-32)$$

Donde α_1 , β_1 son la distancia y la dispersión cromática del enlace de fibra óptica del sistema (el valor de α_1 depende del tipo de fibra usada en el sistema, (ver la Tabla 3-3 y Tabla 3-4 para más información) y α_2 , β_2 corresponden a la longitud de fibra y dispersión cromática en 1550nm del compensador de dispersión.

Los compensadores de dispersión cromática basados en rejillas de *Bragg* (DCM) introducen retrasos en las componentes de alta frecuencia de la señal, con lo cual se compensa los retrasos producidos por la fibra óptica a las componentes de baja señal y da como resultado la compresión del pulso. La Figura 3-17 muestra un compensador de dispersión basado en rejillas de *Bragg*. [20]

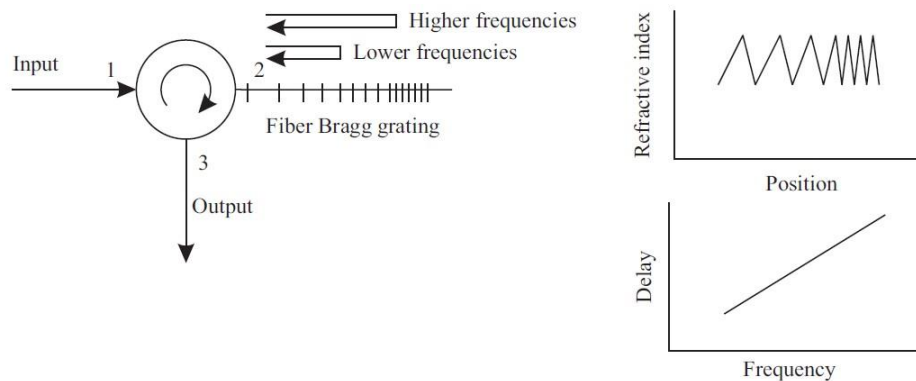


Figura 3-17. Compensador de dispersión basado en rejillas de Bragg. Tomado de [20]

La Figura 3-18 muestra las posibles ubicaciones de los compensadores de dispersión dentro de la arquitectura de un sistema DWDM, con el fin de evitar el impacto de las pérdidas de inserción en el presupuesto de potencia del sistema. En el punto 1, se ubica antes del amplificador de transmisión, lo que se conoce como una pre-compensación, mientras que en el punto 2 se ubica en el receptor en conjunto con esquemas de amplificación de doble etapa, el cual es el esquema más utilizado en redes comerciales.

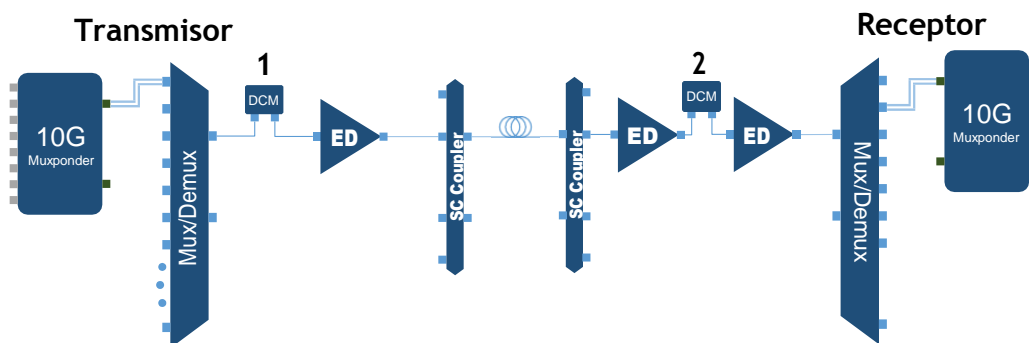


Figura 3-18. Ubicación DCM en sistemas DWDM.

3.1.5. OADM (Optical Add Drop Multiplexer)

Los multiplexores y Demultiplexores ópticos agregan o desagregan todos los canales que están siendo transmitidos en un sistema DWDM, sin embargo, al momento de hacer apertura de tráfico en algún nodo intermedio o de tener una red en topología de anillo, es deseable tener un elemento que permita desagregar un número limitado de canales mientras que permita el paso de los restantes. Este elemento es conocido como un OADM (*Optical Add Drop Multiplexer*) y su funcionalidad básica se presenta en la Figura 3-19 [35].

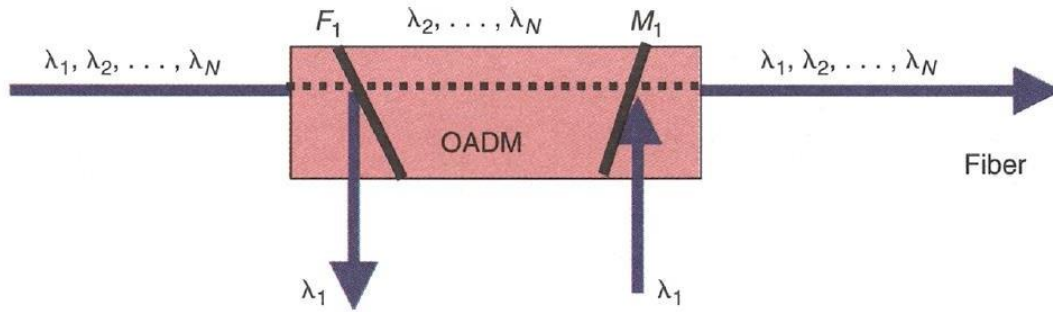


Figura 3-19. Esquema básico Optical Add Drop Multiplexer. Tomada de [35].

El elemento básico usado en la construcción del OADM es la rejilla de *Bragg*, la cual realiza la función de filtro pasa banda, reflejando ciertas longitudes de onda y permitiendo el paso de las restantes de acuerdo a sus parámetros físicos. Para completar las funcionalidades de agregar o desagregar tráfico, se agregan acopladores o circuladores de acuerdo a como se muestra en la Figura 3-20 [36].

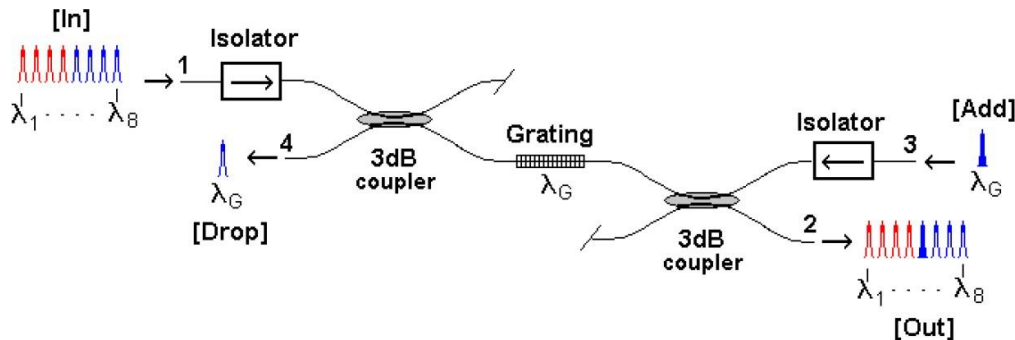


Figura 3-20. OADM basado en rejillas y acopladores. Tomada de [36].

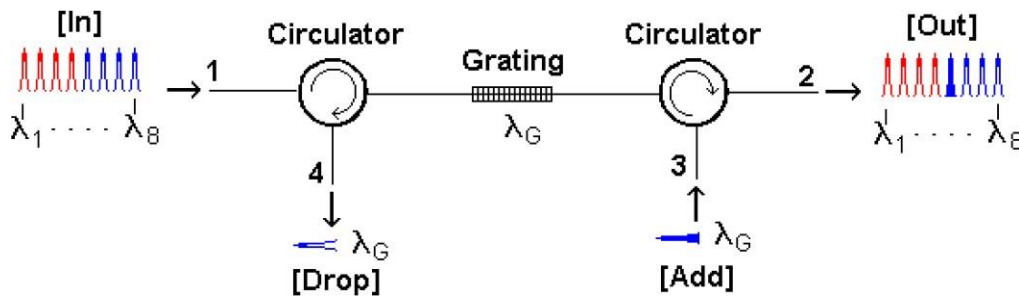


Figura 3-21. OADM basado en rejillas y circuladores. Tomada de [36].

Los OADM se presentan como soluciones costo-efectivas para la agregación de tráfico en nodos intermedios que no tengan un crecimiento significativo, sin embargo, la banda o longitud de onda rechazada por el OADM depende de las características físicas de la rejilla de *Bragg*, por lo tanto el módulo OADM es un elemento pasivo y las longitudes de onda de desagregación son fijas, lo que puede traer problemas de asignación de longitudes de onda en el momento de aumentar el número de canales o aumentar la cantidad de nodos o anillos en la red. Por otro lado, los módulos OADM tienen pérdidas de inserción al ser elementos pasivos, por lo que normalmente se deben agregar amplificadores ópticos adicionales con el fin de mitigar las pérdidas de inserción del elemento.

3.1.6. WSS (Wavelength Selective Switch)

Los elementos de agregación y desagregación de tráfico como Multiplexores u OADM son costo eficientes para configuraciones punto a punto o anilladas, sin embargo, al evolucionar la red hacia topologías de anillos interconectados o redes en malla, se hizo necesario un elemento que permitiera agregar, desagregar o direccionar longitudes de onda desde múltiples orígenes hacia múltiples destinos sin ningún tipo de limitación o bloqueo, lo cual dio paso a un dispositivo que se conocía como OXC (*Optical Cross Connect*). El cual realizaba la conversión O-E-O de todas las señales para realizar la conmutación según el requerimiento de tráfico, no obstante, debido a los altos costos y consumo de potencia de este tipo de dispositivo, se buscó migrar a soluciones que realizaran la conmutación en el dominio óptico, lo que dio paso a los WSS (*Wavelength Selective Switch*). Los WSS permiten seleccionar cualquier longitud de onda de cualquier origen y direccionarlo hacia un puerto de destino. El esquema genérico de los WSS se muestra en la Figura 3-22. En las referencias [37] y [38] se puede encontrar más información sobre el funcionamiento del dispositivo.

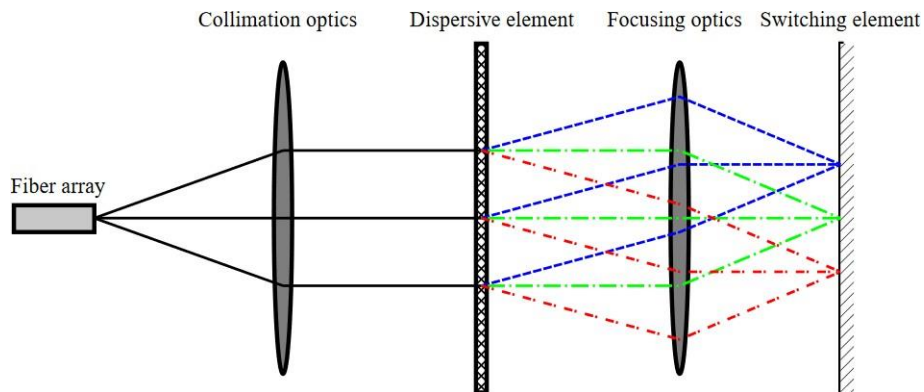


Figura 3-22. Esquema genérico de un WSS, Tomada de [37]

Distribución de espectro óptico

Los sistemas de transmisión basados en tecnología DWDM utilizan transmisores sintonizables en banda C y multiplexores ópticos que permiten agregar las señales con diferente longitud de onda en una misma fibra óptica. Existen dos razones por las cuales se

hace necesario estandarizar las longitudes de onda en un sistema de transmisión. La primera, debido a que los multiplexores son elementos pasivos en los cuales el número de canales y el ancho espectral dependerá de parámetros físicos del dispositivo, los cuales no son configurables. La segunda causa, es con el fin de permitir la interoperabilidad de sistemas desarrollados por diferentes proveedores de tecnología.

La ITU-T estandariza la frecuencias centrales y ancho espectral en la recomendación ITU-T G.694.1 [27]. Debido a que los amplificadores EDFA operan en Banda C, se tiene una banda de operación de 35nm, donde la capacidad total del enlace estará determinado por la cantidad de canales o señales con diferente longitud de onda que se tengan en la fibra y a medida que se aumenta el número de canales, se debe disminuir la separación entre estos, donde se debe tener en cuenta que a medida que se aumenta la tasa de baudios, el ancho de la espectral de una señal aumenta, por lo tanto existe un compromiso entre número de canales, separación y tasa de baudios o formato de modulación a usar, lo cual se debe tener en cuenta en el diseño de la red.

La recomendación ITU-T G.694.1 define la frecuencia central de las señales de un sistema DWDM de acuerdo con la Tabla 3-6.

Tabla 3-6. Asignación de frecuencias recomendación ITU-T G.694.1

<u>Separación (GHz)</u>	<u>Frecuencia Central (THz)</u>	<u>Número estimado de canales</u>
100 (0.8□□)	193.1+□□0.1,□□□□□□	44
50 (0.4□□)	193.1+□□0.05,□□□□□□	88
25 (0.2□□)	193.1+□□0.025,□□□□□□	175
12.5 (0.1□□)	193.1+□□0.0125,□□□□□□	350

El número estimado de canales se calcula considerando una banda útil de 35nm. Algunas tecnologías hacen uso de la banda L para aumentar su número de canales y por lo tanto su capacidad final

En los sistemas de comunicación actuales, es posible tener canales de 10Gb/s con modulación OOK en slots de frecuencia de 100GHz, donde se está desperdiciando el 90% del ancho espectral del slot asignado, por otro lado, si se fija una grilla de 25GHz para optimizar el uso del espectro óptico, las señales de más de 25Gbaud como es el caso de señales con tasas de 100Gb/s con modulación DP-QPSK, no podrán pasar por un multiplexor con un ancho espectral de 25GHz. Debido a esta limitación, la recomendación ITU-T G.694.1 en su última versión liberada (2012), define el concepto de grilla flexible para redes DWDM, donde se define la frecuencia central como:

$$193.1 + \square\square 0.0625 \quad (3-33)$$

Donde \square es un entero positivo o negativo incluyendo el cero y 6.25GHz es la granularidad de frecuencia central nominal. Por otro lado, el ancho del slot debe ser mínimo de 12.5GHz y está definido como:

$$12.5 \square \square \quad (3-34)$$

Donde \square es un entero positivo

La Figura 3-23 muestra un ejemplo del uso de la grilla flexible en un sistema DWDM

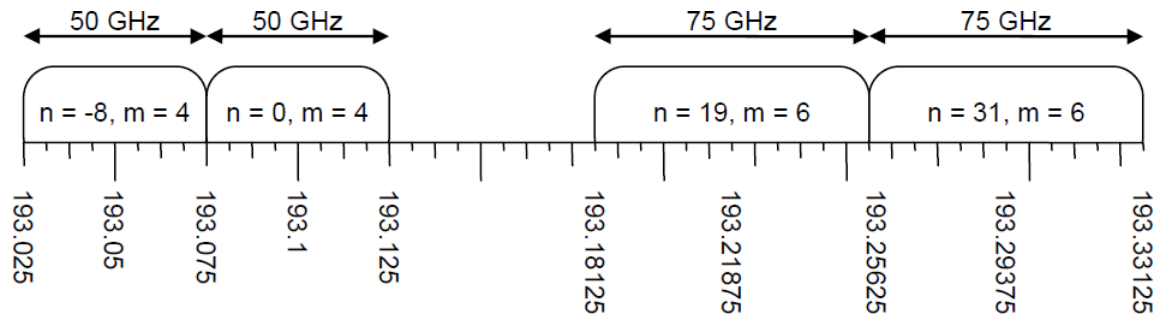


Figura 3-23. Ejemplo del uso de la grilla flexible en sistemas DWDM. Tomada de [27]

La recomendación OIF-FD-FLEXCOH-DWDM-01.0 [39], define la relación entre formato de modulación, tasa de bit neta y ancho del slot de frecuencia requerido como se muestra en la Figura 3-24.

Nominal Channel Bandwidth (GHz)*		37.5	50	62.5	75
Net Bit Rate (Gb/s)	DP-QPSK	100		200	200
	DP-8QAM		200		
	DP-16QAM	200			400
	DP-32QAM			400	
	DP-64QAM		400		

Figura 3-24. Relación Tasa de bit, formato de modulación, y ancho del slot de frecuencia. Tomada de [39].

Arquitectura de Red DWDM

De acuerdo con los conceptos revisados hasta el momento, la tecnología DWDM se compone de transmisores sintonizables siguiendo la recomendación ITU-T G.694.1, elementos que permitan agregar múltiples señales en un mismo hilo de fibra como es el caso de multiplexores ópticos u OADMs, amplificadores EDFA para compensar las pérdidas de inserción del elemento de agregación de tráfico y para permitir la transmisión de la señal a mayor distancia. Adicional a estos elementos, es necesario transportar una señal de supervisión que permita el monitoreo y gestión de los elementos ópticos que componen el sistema en caso de una falla de alguno de sus componentes, por lo tanto, después de los

amplificadores ópticos es agregado un acoplador que une la señal proveniente del amplificador (Banda C) con una señal que normalmente se encuentra en una longitud de onda de 1510nm.

La Figura 3-25 muestra la arquitectura de un sistema DWDM, donde se especifica las bandas de operación, de supervisión y se muestra la funcionalidad principal de cada elemento del sistema.

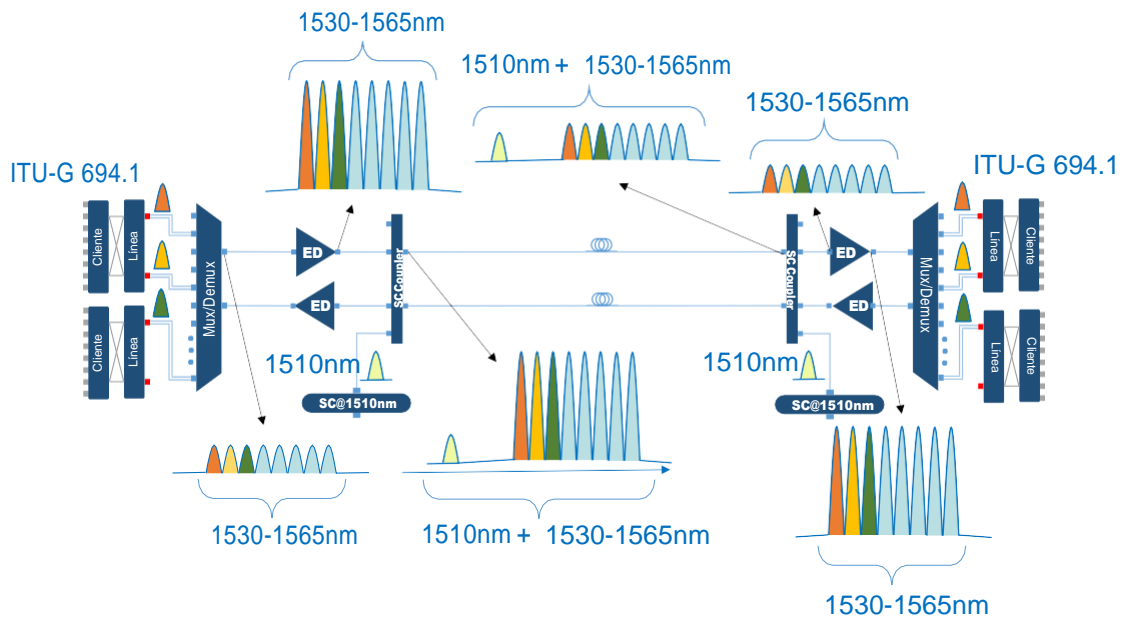


Figura 3-25. Distribución de longitudes de onda en un sistema DWDM.

3.2. Optical Transport Networks (OTN)

En los últimos 25 años se ha evidenciado un incremento dramático en la capacidad de las redes ópticas, motivado por los significativos cambios ocurridos en los tipos de servicios que son transportados por las redes. Mientras que el tráfico actual es dominado por datos y video, en la década de 1980 el tráfico provenía básicamente del servicio de telefonía [40]. Por esta razón, las redes de transporte eran diseñadas para el tráfico de voz, donde cada canal de voz se transmitía a una tasa básica de 64 Kbits/s, conocida como la representación digital de la voz en el sistema de modulación por pulsos codificados (PCM) o como la señal digital de nivel 0 (DS0).

Las redes de comunicación digital diseñadas para transporte de tráfico de voz utilizaban como medio de transmisión par de cobre, cable coaxial o enlaces de microondas con una

jerarquía que agrupaba varios canales DS0 utilizando multiplicación por división de tiempo llamada jerarquía digital pliesiócrona (PDH) y luego adaptadas para transmisión por fibra óptica usando la jerarquía digital síncrona (SDH). La jerarquía digital pliesiócrona se desarrolló de manera independiente en Estados Unidos, Europa y Japón, dando como resultado tres estándares llamados portadora T, portadora E y portadora J respectivamente. El estándar más utilizado es el europeo y tiene como unidad base el circuito E1 formado por 30 canales DS0 más 2 canales destinados para señalización y control, teniendo una tasa de bits total de 2048kbit/s (32 canales x 64kbit/s)

Al aumentar la demanda de capacidad del sistema de transporte y ser necesario aumentar la distancia de transmisión limitada por los medios de cobre o inalámbricos, fue necesario adaptar el transporte del tráfico de voz a un medio con mayor ancho de banda y mejores condiciones de propagación como la fibra óptica, dándole paso al estándar SDH, el cual tomaba 63 circuitos E1 para formar su unidad básica llamada STM-1 y lograr alcances hasta de 120km en transmisión. El protocolo SDH/SONET fue dominante en las redes de transporte de primera generación debido a que la mayoría de tráfico era TDM. En este trabajo no se hará mucho énfasis en este protocolo, sin embargo, la jerarquía de multiplicación y especificaciones de las interfaces físicas del protocolo SDH pueden ser encontradas en la Tablas 6-2 de la referencia [41], la tabla 1 de la referencia [28] y las tablas 1a/1b/14c de la referencia [42].

En el año 1985 fue publicada la primera versión del estándar IEEE 802.3, también conocido como Ethernet, basado en una técnica de acceso al medio llamada CSMA/CD (*Carrier Sense Multiple Access with collision detection*) la cual consistía en que cualquier estación de una red podía transmitir información en cualquier momento verificando primero el estado del canal evitando colisiones.

El estándar Ethernet fue ganando poco a poco más popularidad hasta convertirse en el estándar predilecto para comunicación de datos en una red local de dispositivos. A medida que el estándar fue evolucionando desde su primera versión que operaba a una tasa de 10Mb/s hasta lograr tasas de 10Gb/s para redes de área local (LAN), se vio la necesidad de interconectar las redes de datos privadas, por lo tanto el estándar Ethernet desarrolló la interfaz 10GBASE-W (WAN PHY) para el transporte de tráfico de datos basados en Ethernet por medio de redes de transporte TDM basadas en el protocolo STM-64. [41][43]

Los protocolos SDH, Ethernet y Fibre Channel fueron desarrollados de manera independiente para suplir las necesidades de transporte de diferentes aplicaciones como circuitos de voz basados en tecnología TDM, Redes de área local basadas en paquetes o redes de almacenamiento, por lo tanto el operador que quisiera ofrecer servicios basado en diferentes aplicaciones necesitaría tener redes independientes para cada tecnología, lo que implica aumento en el capital y en los costos operaciones de la red.

Con el fin de tener redes de transporte agnósticas al protocolo de transporte, se crea el protocolo OTN, el cual es definido en las recomendaciones ITU-T G.709 [44] y ITU-T G.872 [45]. Las principales ventajas del protocolo OTN se presentan a continuación:

- Protocolo de transporte basado en conmutación de circuitos
- Soporte a protocolos cliente de diversas naturalezas (circuitos o paquetes) y diversas aplicaciones (SAN, LAN, TDM)

- Alta escalabilidad, soportando agregación de señales desde 100Mbps (FE) hasta 100Gb/s (OTU4/100GbE)
- Protocolo diseñado para transporte WDM
- Implementación de códigos de error de error fuera de banda, lo que permite un mayor alcance de la señal sin regeneración

El protocolo OTN se encarga de adaptar las señales clientes de diversas naturalezas a un protocolo unificado con encabezados de monitoreo, control y corrección de errores. Este proceso se realiza por medio de capas en el dominio eléctrico y el dominio óptico.

En el dominio eléctrico, las capas de red del protocolo OTN se presentan en la Figura 3-26:

- OPU: encargado de encapsular y justificar la tasa de la señal cliente hacia la tasa del contenedor OPU. Esta capa cumple funciones similares a la capa de enlace de la tecnología SDH.
- ODU: Agrega encabezados para operación y mantenimiento de la señal del cliente en sus extremos de interconexión, incluyendo encabezados para conexiones tándem, transmisión de señales de control de los protocolos cliente y conteo de errores del lado cliente. Esta capa cumple funciones similares a la capa de multiplexación de la tecnología SDH.
- OTU: Agrega encabezado adicional para operación y mantenimiento de la señal cliente tanto en sus puntos terminales como en los puntos de regeneración. Adiciona un encabezado para corrección de errores (FEC).

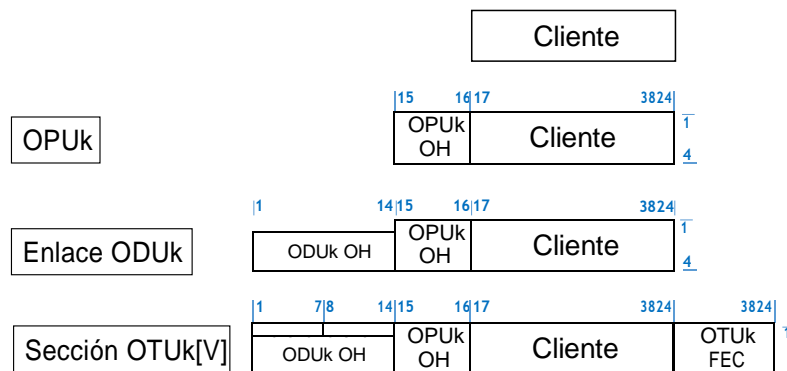


Figura 3-26. Encabezados OPU/ODU/OTU.

En el dominio óptico, las capas de red del protocolo OTN son:

- OCh: Es la primera capa óptica del protocolo OTN, toma la información de la capa digital OTU y la modula en una longitud de onda de acuerdo a la recomendación ITU-T G.694.1.
- OMS: El OMS se compone de múltiples OCh, representa la interconexión entre los Multiplexores y Demultiplexores de un enlace óptico
- OTS: Representa la conexión entre cualquier de los elementos de la red OTN, en un caso práctico, entre los amplificadores.

La Figura 3-27 muestra la jerarquía completa del protocolo OTN y la Figura 3-28 las representa en un esquema básico de red WDM.

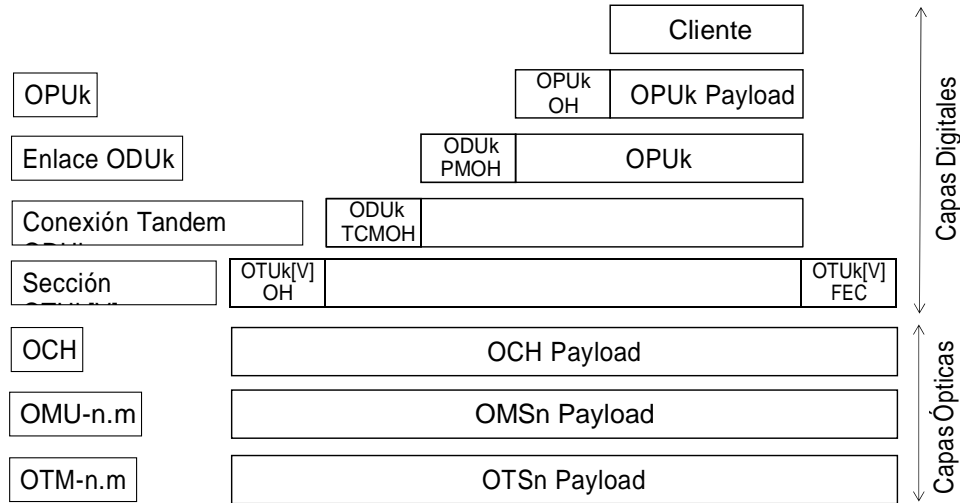


Figura 3-27. Jerarquía OTN

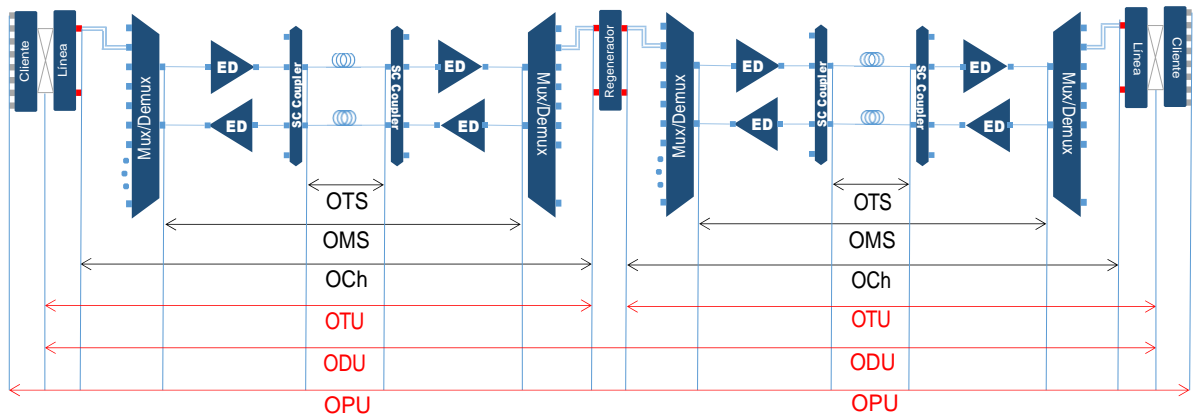


Figura 3-28. Capas Digitales y Ópticas OTN en una red WDM.

En la Tabla 3-7 se presentan las tasas de bit nominales para las capas digitales OPU, ODU y OTU del protocolo OTN.

Tabla 3-7. Tasas de bit nominales OTN.

<u>Capa</u>	<u>Tasa nominal de bit (kbit/s)</u>	<u>Capa</u>	<u>Tasa nominal de bit (kbit/s)</u>
OTU1	255/238 × 2 488 320	ODUCn	n × 239/226 × 99 532 800
OTU2	255/237 × 9 953 280	ODU2e	239/237 × 10 312 500
OTU3	255/236 × 39 813 120	OPU0	238/239 × 1 244 160
OTU4	255/227 × 99 532 800	OPU1	2 488 320
OTUCn	n × 239/226 × 99 532 800	OPU2	238/237 × 9 953 280
ODU0	1 244 160	OPU3	238/236 × 39 813 120
ODU1	239/238 × 2 488 320	OPU4	238/227 × 99 532 800
ODU2	239/237 × 9 953 280	OPUCn	n × 238/226 × 99 532 800
ODU3	239/236 × 39 813 120	OPU2e	238/237 × 10 312 500
ODU4	239/227 × 99 532 800	OPUflex	Tasa de bit señal cliente

Nota: Solo se incluyen las tasas de bit a nivel OTU y ODU. Para más detalles sobre las tasas de bit OPU, ver la recomendación ITU-T G.709 [44].

Adicional a la posibilidad de transportar múltiples protocolos, sus funcionalidades de monitoreo, operación y mantenimiento y su adaptación a redes WDM, el protocolo OTN se caracteriza por integrar códigos de corrección de error fuera de banda como se ilustra en la Figura 3-26. El código de corrección de error agrega un encabezado que puede ir desde 7% hasta 25% de la señal con el fin de detectar y corregir errores durante la transmisión, lo cual se presenta como la principal ventaja del protocolo OTN a nivel de desempeño óptico, ya que permite que el sistema sea diseñado para tasas de error de bit mayores y permitiendo aumentar en gran medida la distancia que puede recorrer la señal sin necesidad de regeneración.

La recomendación ITU-T G.709 [44] define el código de corrección de error *Reed Solomon* RS(255,239), el cual tiene un encabezado de 7% y una ganancia de código neta de 5.9dB. La ganancia de código neta se define como la diferencia entre el valor del factor de calidad necesario para obtener una tasa de error de 10^{-12} sin el uso de FEC y el factor de calidad necesario para obtener la tasa de error límite (tasa de error de entrada necesaria para obtener una tasa de error de 10^{-12} en la salida) con el uso de FEC. En la recomendación ITU-T G.975.1 [46] se desarrollaron códigos de corrección de error más robustos para los sistemas submarinos y fueron adaptados después a sistemas terrestres.

En la Tabla 3-8 se presentan los diferentes códigos de corrección de error evaluados en la recomendación ITU-T G 975.1 y sus principales características, mientras que en la Tabla 3-9 se presentan los parámetros relevantes de cada código, como la tasa de redundancia,

ganancia de código y tasa de error de bit límite (tasa de error de entrada necesaria para obtener una tasa de error de 10^{-12} en la salida).

Tabla 3-8. Esquemas de FEC recomendación ITU-T G-975.1 / G.709.

<u>Clausula</u>	<u>Tipo de Código</u>	<u>Código FEC usado</u>
I.2	FEC Concatenado	Código Externo: RS(255,239) Código Interno: CSOC
I.3	FEC Concatenado	Código Externo: BCH(3860,3824) Código Interno: BCH(2040,1930)
I.4	FEC Concatenado	Código Externo: RS(1023,1007) Código Interno: BCH(2047,1952)
I.5	FEC Concatenado	Código Externo: RS(1901,1855) Código Interno: Hamming Extendido (512,502) x (510,500)
I.6	FEC No Concatenado	Código LDPC
I.7	FEC Concatenado	Dos códigos BCH ortogonales concatenados
I.8	FEC No Concatenado	RS(2720,2550)
I.9	FEC Concatenado	Dos códigos BCH extendidos (1020,988) intercalados
Tomado de las referencias [44] y [46]		

Tabla 3-9. Características FEC recomendación ITU-T G-975 / G.709.

<u>Esquema de FEC</u>	<u>BER mínimo(*)</u>	<u>Ganancia de Código</u>	<u>Ganancia de Código Neta</u>	<u>Tasa de Redundancia</u>
RS (255,239) / G.709 FEC	1.8×10^{-4}	5.9	5.6	6.69%
Código Externo: RS(255,239)	5.8×10^{-3}	8.9	7.95	24.48%
Código Interno: CSOC (n0/k0=7/6, J=8)				
Código Externo: BCH(3860,3824)	3.3×10^{-3}	8.26	7.98	6.69%
Código Interno: BCH(2040,1930)				
Código Externo: RS(1023,1007)	2.26×10^{-3}	7.91	7.63	7%

Código Interno: BCH(2047,1952)				
Código Externo: RS(1901,1855)	4.6×10^{-3}	8.6	8.4	6.69%
Código Interno: Hamming extendido (512,502) x (510,500)				
Código Externo: RS(1901,1855)	1.9×10^{-3}	7.7	7.5	6.69%
Código Interno: Extended Hamming Product Code (512,502) x (510,500)				
Código LDPC	1.33×10^{-3}	7.39	7.10	7%
Dos códigos BCH ortogonales concatenados 7% OH	2.2×10^{-3}	7.85	7.53	7%
Dos códigos BCH ortogonales concatenados 11% OH	4.630×10^{-3}	8.64	8.2	11%
Dos códigos BCH ortogonales concatenados 25% OH	1.32×10^{-2}	10.02	9.04	25%
RS(2720,2550)	1.26×10^{-3}	7.35	7.06	7%
Dos códigos BCH extendidos (1020,988) intercalados	4.00×10^{-3}	8.91	8.63	6.69%

(*) Nota: el parámetro BER Mínimo corresponde a la tasa de error de bit mínima que soporta el código para dar una tasa de error de salida de 10⁻¹². Tomado de las referencias [44] y [46]

Resumen

Este capítulo presentó las características principales de los sistemas de comunicación por fibra óptica, como las bandas de operación, características de los diferentes tipos de fibra óptica, los componentes que permiten agregar y transmitir los diferentes canales o servicios en un medio físico compartido y el protocolo que permite agregar tráfico de distinta naturaleza en una red unificada.

4. Diseño de Redes de Transporte Ópticas

Luego de presentar la tecnología base de las redes de transporte de alta capacidad y largo alcance, se debe conocer las limitaciones y restricciones que implica aumentar la capacidad del sistema a nivel de número de canales o de tasa de bit por canal. En este capítulo se presentan análisis a nivel de presupuesto de potencia, relación señal a ruido, latencia, dispersión cromática, dispersión por modo de polarización y efectos no lineales, donde se definen las capacidades finales y los parámetros de ingeniería para cumplir con un escenario de red final determinado.

4.1. Presupuesto de potencia óptico

El presupuesto de potencia óptico se usa para calcular la distancia máxima de fibra óptica que se puede tener entre dos elementos activos, sean amplificadores o transponders. Para realizar el cálculo del presupuesto de potencia para un sistema mono canal solo se debe conocer la potencia de salida del elemento activo ubicado en la transmisión, las pérdidas de inserción de todos los elementos en la ruta y la potencia mínima de recepción del elemento activo ubicado en la recepción. Debido a que el sistema se diseña para el peor escenario, normalmente se considera un margen de seguridad con el fin de que el sistema siga operativo en caso de degradación de algún componente óptico o atenuación por envejecimiento o eventos de fibra óptica. La Figura 4-1 muestra el modelo de presupuesto de potencia para un sistema punto a punto mono canal.

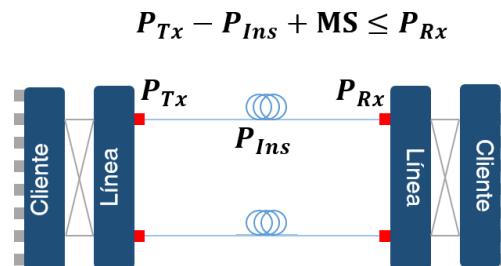


Figura 4-1. Modelo de presupuesto de potencia para un enlace mono canal.

El análisis de presupuesto de potencia en sistemas DWDM es un poco más complejo, ya que los amplificadores ópticos del sistema deben estar diseñados para soportar el crecimiento futuro sin entrar en región de saturación. El modelo de presupuesto de potencia para sistemas DWDM con amplificadores ópticos se presenta en la Figura 4-2.

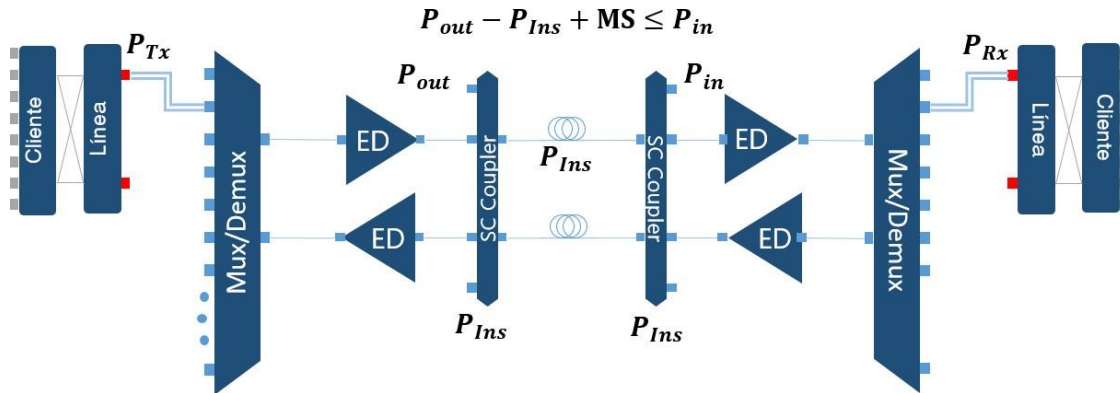


Figura 4-2. Modelo de presupuesto de potencia para un enlace WDM.

Algunos parámetros importantes para tener en cuenta en el presupuesto de potencia de sistemas DWDM se presentan a continuación:

Potencia máxima de transmisión por canal: El valor máximo de potencia por canal es una regla de ingeniería dada por el fabricante para optimizar la distancia del enlace sin necesidad de amplificar y para evitar la aparición de efectos no lineales en la fibra, los cuales son más notorios a medida que se aumenta la tasa de bit o la potencia de salida. La potencia de salida por canal también está limitada por el número de canales del sistema y por la potencia de salida máxima del amplificador, ya que el sistema debe ser diseñado para alcanzar la capacidad final del sistema. En la Figura 4-3 se muestra la situación planteada. Si inicialmente se implementa 1 canal, la potencia de salida del amplificador estará dada por P_{out} [dBm], al implementar un segundo canal la potencia será de $P_{out} + 3$ [dBm] (el doble de potencia implica un aumento de 3dB). Para N canales, la potencia de salida del amplificador será de $P_{out} + 10 \log_{10} N$ [dBm]. Para un sistema de 40 canales, la potencia aumentara desde la capacidad inicial hasta la capacidad final en un valor cercano a 16dB, para 80 canales, el valor es cercano a 19dB. En este orden de ideas, si se cuenta con un amplificador de 21dBm de potencia de salida máxima y se tiene una red diseñada para 80 canales, la potencia de salida por canal no podrá ser mayor a 2dBm.

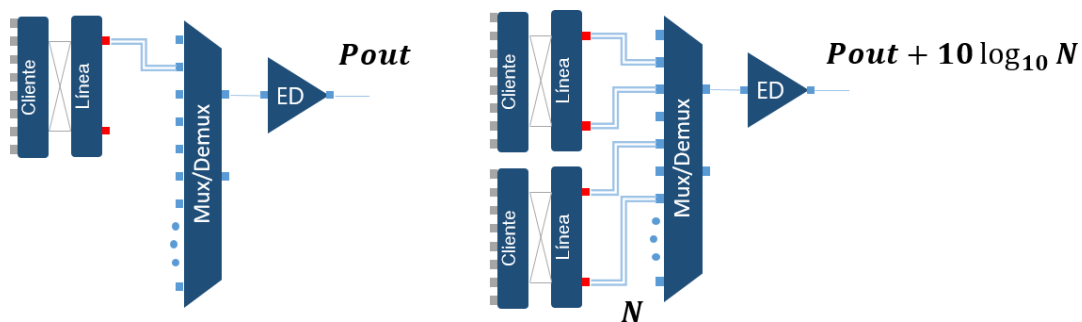


Figura 4-3. Cálculo de potencia de salida por canal

Potencia mínima de recepción por canal: Es el valor mínimo que soporta el amplificador o el elemento activo ubicado en la recepción. Este valor está dado por el fabricante del amplificador y normalmente depende de la tasa de bit de la señal.

El procedimiento para realizar el presupuesto de potencia en una red DWDM es el siguiente:

- Conociendo la P_{in} del transponder y la P_{out} del multiplexor, calcular la potencia de entrada al amplificador. La potencia de entrada para 1 canal debe ser mayor a la sensibilidad y la potencia de entrada para N canales debe ser menor al valor de saturación del amplificador. En caso de ser necesario, se debe colocar un atenuador en la entrada del amplificador, definiendo de esta forma el punto de operación óptimo que permita el funcionamiento de un canal y el crecimiento futuro.
- Dependiendo de la ganancia y potencia de salida máxima del amplificador, el número de canales y las reglas de ingeniería del fabricante para la potencia de salida por canal para diferentes tasas de bit, definir la potencia de salida por canal de acuerdo a la Figura 4-3.
- Identificar las pérdidas de inserción de los elementos pasivos involucrados en el sistema después de la ubicación del elemento activo de transmisión, como por ejemplo acopladores de canal de servicio, pérdidas en ODF, pérdidas en empalmes, pérdidas de la fibra, margen de seguridad, etc.
- Con los datos de potencia de salida por canal, pérdidas de inserción, margen de seguridad y distancia y tipo de fibra, calcular la potencia de entrada del elemento activo ubicado en recepción y verificar que se encuentre en un nivel superior al valor de sensibilidad del elemento. También se debe verificar que para el crecimiento futuro, el elemento de recepción no quede saturado y en caso de hacerlo, atenuar la entrada de este elemento para obtener su punto de operación.

4.2. Análisis relación señal a ruido

El presupuesto de potencia calculado en el ítem anterior permite determinar la posición de los amplificadores ópticos para garantizar que la potencia se mantenga en niveles adecuados para la correcta operación del sistema y garantizando su crecimiento hasta la capacidad final. Ahora bien, los amplificadores EDFA inducen ruido ASE a la señal y a medida que se agreguen amplificadores en cadena el ruido se va acumulando y degradando la señal hasta llegar un punto en que es reconocida por el receptor.

Existen múltiples fuentes de ruido en un sistema de comunicación óptica, como es el caso de los amplificadores ópticos con su ruido ASE, los receptores ópticos con su ruido térmico, entre otros, pero el ruido ASE es predominante, por esta razón los análisis de relación señal a ruido del sistema son limitados a ruido ASE y no considera fuentes alternas.

Según el suplemento 39 de la ITU-T [47], la relación señal a ruido para un sistema con un amplificador en recepción como se muestra en la Figura 4-4 está dada por:

$$SNR_{out} = SNR_{in} - \alpha - \beta - 10 \log_{10} h \quad SNR_{in} = SNR_{out} - \alpha + 58 \quad (4-1)$$

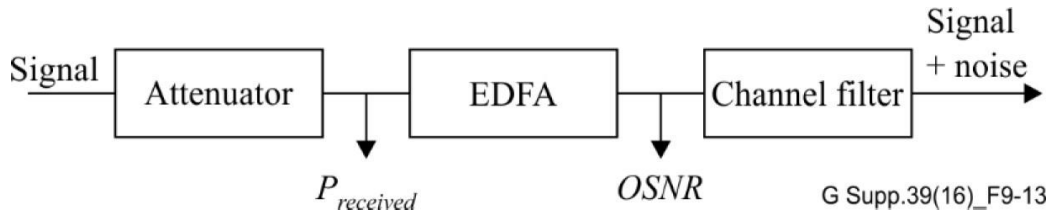


Figura 4-4. OSNR para un sistema con un amplificador EDFA en recepción.

De esta forma, al tener el presupuesto de potencia del enlace, es posible calcular la relación señal a ruido del sistema fácilmente

En caso de tener amplificadores en cascada, la relación usada para calcular el OSNR total del sistema es la siguiente:

$$OSNR_{total} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\frac{1}{OSNR_1} + \frac{1}{OSNR_2} + \frac{1}{OSNR_3} + \dots + \frac{1}{OSNR_n}} \right) \quad (4-2)$$

4.3. Latencia en redes de transporte

Debido al aumento de aplicaciones y servicios en tiempo real, la latencia se está volviendo cada vez más importante en las redes de datos. Las nuevas aplicaciones en mercados verticales como financiero, energía, petróleo, medicina, entre otros, requieren una latencia cada vez más baja, por lo que los operadores deben adaptar sus redes para soportar este tipo de aplicaciones. En redes de transporte óptica, existen varios factores que influyen en la latencia del sistema, entre las que se encuentran los equipos activos (*Switches, Routers, Transponders, Amplificadores*) y la fibra óptica [48].

Para analizar la latencia provocada por la fibra óptica, debemos recordar que la luz viaja en el vacío a una velocidad finita de 299.792 km/s, lo cual equivale a una latencia de 3.34 ns/km. Por otro lado, la luz en un medio diferente del vacío se propaga con una velocidad de propagación dada por $v = c/n$, donde n es el índice de refracción del medio. De esta forma la latencia puede ser calculada con la relación $latencia = distancia / v = distancia \cdot n / c$. En la referencia [48] se muestra que las fibras G.652 y G.655 presentan índices de refracción de 1.4679 y 1.4684 respectivamente, por lo tanto la latencia inducida es de 4.903 ns/km y 4.904 ns/km respectivamente. Debido a este resultado, es posible aproximar la latencia inducida por la fibra óptica mono modo a un valor de 5 ns/km independiente de la especificación.

Para redes DWDM que transporten canales con modulación OOK y tasas de bit menores o iguales a 10Gbps, se deben instalar módulos compensadores de dispersión de fibra distribuidos en la red con el fin de permitir la transmisión a larga distancia. Los módulos compensadores pueden ser basados en rejillas de *Bragg* o en tramos de fibra óptica de dispersión desplazada (ver sección 3.1.4).

En el caso de que la red use compensadores de dispersión basados en fibra, se debe calcular la longitud de la fibra compensadora de dispersión que se debe agregar al enlace,

usando la formula $\alpha_1 \alpha_1 + \alpha_2 \alpha_2 = 0$, donde α_1 y α_2 son las constantes de dispersión para una longitud de onda de 1550nm de las fibras de transmisión y compensadora de dispersión respectivamente. Si se considera una longitud de fibra estándar de 100km, una dispersión en 1550nm de 18 ps/km para fibra G.652 y de 6 ps/km para fibra G.655 y una dispersión de fibra compensada de -49 ps/km en 1550nm, se encuentra que para fibras G.655 se debe agregar cerca de 12% adicional de fibra compensada, mientras que para fibra G.652 el porcentaje es de 36%.

Otros elementos que inducen latencia en los sistemas ópticos son los *transponders* y los amplificadores EDFA. Los *transponders* tienen una latencia asociada al realizar la conversión E-O y debido al uso de códigos de corrección de errores, sus valores son del orden de 150ns, sin embargo existen proveedores que desarrollan *transponders* optimizados para aplicaciones de baja latencia, con valores del orden de nanosegundos [49]. Por otro lado, los amplificadores EDFA presentan en su diseño tramos de fibra óptica dopada del orden de mínimo 8 metros por cada etapa de amplificación y llegando a valores de 30 metros por cada amplificador en configuraciones de doble etapa. [50]

Para calcular la latencia total de un sistema DWDM compensado o híbrido que use compensadores de dispersión basados en fibra, es posible considerar la siguiente relación:

$$L_{total} = L_{transponder} + L_{EDFA} + L_{fibra} + L_{compensador} \quad (4-3)$$

Para el caso de sistemas coherentes o sistemas compensados o híbridos que usen compensadores de dispersión basados en rejillas de *Bragg*, es posible usar la siguiente relación:

$$L_{total} = L_{transponder} + L_{EDFA} + L_{fibra} + L_{compensador} \quad (4-4)$$

Donde

$$L_{transponder} = 5 \left(\frac{100}{1000} \right) \times 150 = 7.5 \text{ ns}$$

$$L_{EDFA} = 5 \left(\frac{100}{1000} \right) \times 30 = 1.5 \text{ ns}$$

$$L_{fibra} = 5 \left(\frac{100}{1000} \right) \times 18 = 0.9 \text{ ns}$$

$$L_{compensador} = 5 \left(\frac{100}{1000} \right) \times 49 = 2.45 \text{ ns}$$

$$L_{total} = 12.35 \text{ ns}$$

4.4. Análisis de Dispersión

En los sistemas de comunicación óptica de larga distancia se presentan varios tipos de dispersión, para las fibras multi-modo, la dispersión intermodal se presenta como la limitación mas relavante, mientras que para la fibra mono-modo, la dispersión cromática y por modo de polarización se presentan como los factores críticos al momento de aumentar capacidad o distancia de transmisión en los sistemas actuales. Debido a que en este trabajo solo se considera la transmisión por fibra mono-modo, se presenta a continuación las

implicaciones de estos dos tipos de dispersión en el diseño de redes de transporte.

4.4.1. Dispersión Cromática

La dispersión cromática se presenta en las fibras mono-modo debido a que el pulso del láser no es totalmente monocromático, por lo tanto sus componentes de baja frecuencia viajan a una velocidad diferente que sus componentes de alta frecuencia, causando un ensanchamiento temporal del pulso a medida que se transmite por la fibra óptica. Este fenómeno es más notorio a medida que aumenta la tasa de bit de la señal transmitida [20].

Lo primero que se debe tener en cuenta al momento de realizar el análisis de dispersión cromática es el tipo de fibra que se use en los enlaces. En las Tabla 3-2, Tabla 3-3 y Tabla 3-4 se presentan las características de las fibras G.652, G.653 y G.655 respectivamente, donde los parámetros de dispersión para la banda de 1550 nm usados normalmente en el diseño son de 17 ps²/km/nm, 0 ps²/km/nm y 6 ps²/km/nm respectivamente

El análisis de dispersión cromática depende del tipo de red y características de los transmisores y receptores usados en el sistema. En el caso de una red compensada que use transmisores a 10Gb/s con modulación OOK, el receptor usado es un foto detector, el cual soporta alrededor de 1600 ps²/km de dispersión cromática, lo que equivale a cerca de 94 km de fibra G.652. Por este motivo, si se tiene una red de transporte de larga distancia, es necesario agregar compensadores de dispersión distribuidos en la red con el fin de mantener los valores de dispersión cromática en los niveles soportados por el receptor. Un sistema DWDM compensado con separación de 100km entre amplificadores se muestra en la Figura 4-5.

Los compensadores de dispersión comerciales tienen valores discretos, ya que de acuerdo con lo explicado en la sección 3.1.4, tanto los compensadores basados en fibra como basados en rejillas de *Bragg* son elementos fijos y pasivos, en los cuales la dispersión compensada depende de parámetros físicos del dispositivo. Por esta razón, los sistemas DWDM tendrán una diferencia entre la dispersión inducida por la fibra y la dispersión compensada, lo cual se conoce como dispersión cromática residual. Para el diseño de este tipo de redes se debe conocer la tolerancia a dispersión cromática del receptor y se debe diseñar el sistema para que la dispersión residual sea menor que la tolerancia del receptor. Para sistemas de mayor distancia, se debe diseñar el sistema para que la dispersión cromática residual sea muy baja, ya que a medida que aumentan los tramos es posible que ésta aumente hasta llegar al punto de sobrepasar la tolerancia del receptor, siendo necesario agregar un punto de regeneración intermedio, lo cual aumentará de manera significativa el Capex del proyecto. En la Figura 4-6 se muestra la relación entre los parámetros explicados anteriormente.

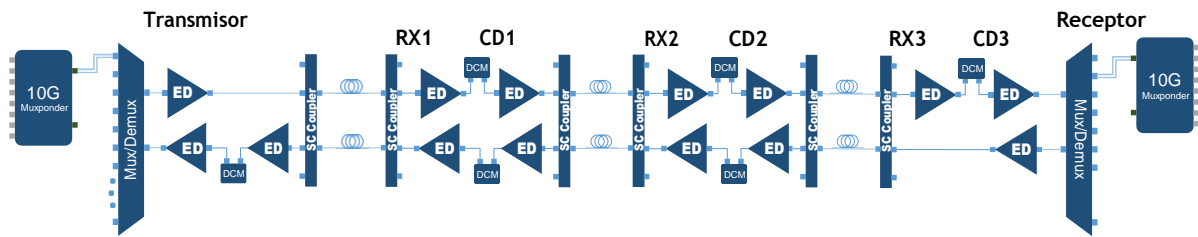


Figura 4-5. Sistema DWDM compensado en topología punto a punto.

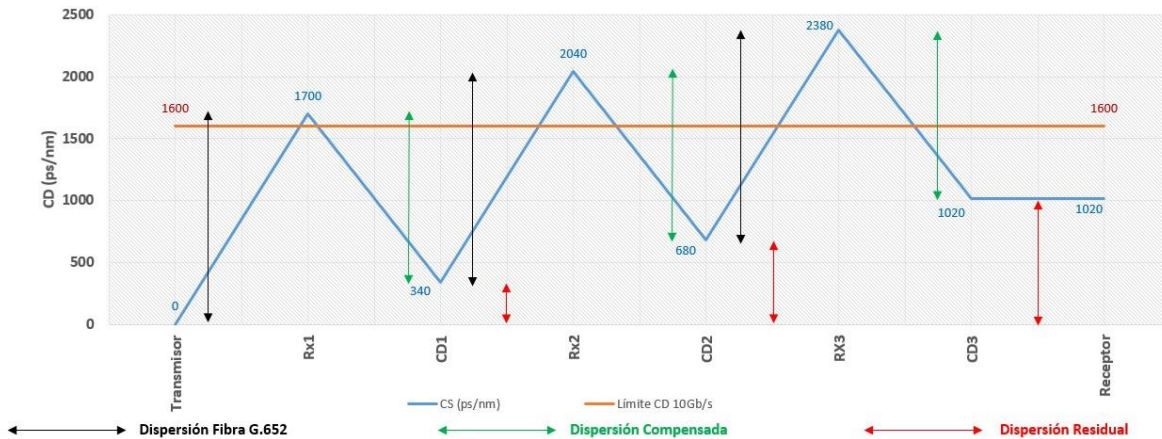


Figura 4-6. Análisis de dispersión en un sistema DWDM compensado

Al momento de aumentar la tasa de bit de 10Gb/s a 40Gb/s y 100Gb/s, la dispersión cromática se convirtió en un factor más relevante, por lo tanto fueron desarrollados transmisores con modulaciones de nivel superior como es el caso de DP-QPSK para 100Gb/s y DP-8QAM y DP-16QAM para 200Gb/s que hacen uso de receptores coherentes, que permiten detectar la fase de la señal y compensar los efectos lineales como dispersión cromática y PMD por medio de procesamiento digital de señales. En la Figura 4-7 se muestra un sistema coherente punto a punto con separación de amplificadores de 500km y su respectivo análisis de dispersión cromática, considerando que los *transponders* a 100Gb/s soportan dispersión cromática del orden de 40.000 ps/nm y los *transponders* a 200Gb/s soportan dispersión de 20.000 ps/nm para modulación DP-8QAM y 16.000 ps/nm para modulación DP-16QAM [51], como se muestra en la Figura 4-8.

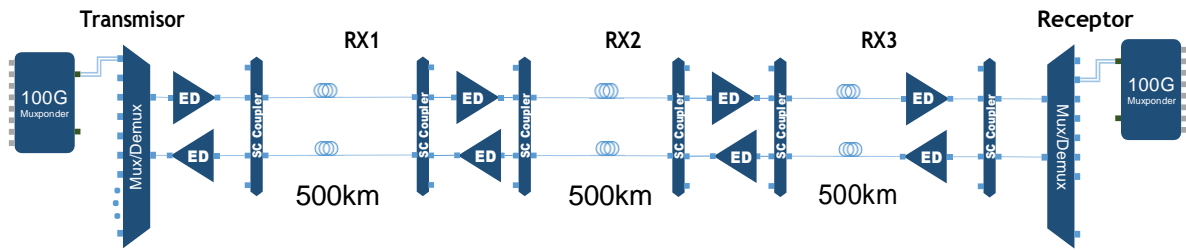


Figura 4-7. Sistema DWDM coherente en topología punto a punto

Si consideramos fibra óptica estándar G,652, con una dispersión de 17 ps/nm/km, al momento de recorrer 500km y debido a que no se tienen compensadores de dispersión, la dispersión cromática acumulada será de 8500 ps/nm en el punto Rx1, 17000 ps/nm en el punto Rx2 y 25500 ps/nm en el punto Rx3. Los receptores coherentes soportan dispersión cromática del orden de 40000 ps/nm para canales a 100Gb/s con modulación DP-QPSK y de 20000 ps/nm para tasas de 200Gb/s y modulación DP-8QAM [51], por lo tanto pueden soportar distancias sin regeneración cercanas a 2400 km para tasas de 100Gb/s y 1200 km para tasas de 200Gb/s respectivamente.

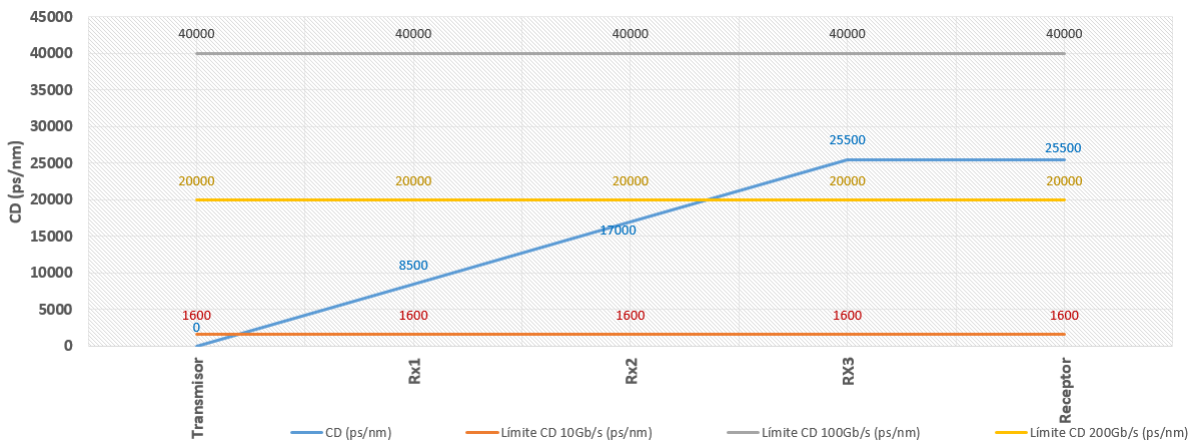


Figura 4-8. Análisis de Dispersión en un sistema DWDM Coherente

4.5. Dispersión por Modo de Polarización

La polarización es una propiedad de las ondas electromagnéticas que describe la dirección del campo eléctrico transversal, el cual es perpendicular a la dirección de propagación (normalmente se define a \hat{z} como la dirección de propagación, por lo tanto, el campo eléctrico estará en dirección \hat{x} o \hat{y}). El estado de polarización de una señal se define como el patrón trazado por el campo eléctrico como función del tiempo [29].

En una fibra óptica ideal, sin imperfecciones y con simetría circular, las componentes transversales a la dirección de propagación presentan el mismo retraso de grupo, por lo que el estado de polarización al inicio y al final del enlace será similar. Sin embargo, en la práctica la fibra presenta imperfecciones, dando como resultado una birrefringencia de la

fibra $\Delta\beta$ y una diferencia en el retraso de grupo $\Delta\tau_1$ entre los dos estados de polarización dada por la siguiente relación [29]:

$$\Delta\tau_1 = |\tau_{1,o} - \tau_{1,s}| = \frac{L}{c} |\beta_o - \beta_s| \quad (4-5)$$

Donde β_o y β_s corresponden a los índices de refracción correspondientes a cada polarización, y $\beta_1 = \delta\beta/\delta\omega$.

Después de que la señal es propagada sobre una distancia L , el retraso de grupo diferencial o más conocido como DGD (Differential Group Delay) es igual a $\Delta\tau = \text{PMD} * \sqrt{L}$, donde PMD es el parámetro de PMD de la fibra, dada en ps/√km [20].

En fibras usadas en los enlaces de larga distancia, la birrefringencia es aleatoria y varía tanto con la distancia como con el tiempo, por lo tanto, la birrefringencia en un cambio aleatorio del estado de polarización lo cual también implica que el DGD es una distribución estadística, que se conoce como PMD y es definida como el promedio estadístico del DGD.

$$\text{PMD} = \langle \Delta\tau \rangle \quad (4-6)$$

Los receptores comerciales presentan el valor de PMD soportado para cada formato de modulación, donde se presentan valores típicos de 30 ps para tasas de 100Gb/s con formatos de modulación DP-QPSK y 15 ps para tasas de bit de 200Gb/s con formatos de modulación DP-8QAM o DP-16QAM [52].

4.6. Efectos No Lineales

Los efectos no lineales surgen del alto confinamiento de las ondas electromagnéticas al propagarse en el núcleo de una fibra mono-modo. Para las fibras G.652, el área efectiva del núcleo de la fibra es típicamente de $85 \mu\text{m}^2$ y es menor para fibras G.655 y G.653. Si la potencia de salida del láser es cercana a 1W, la intensidad de la luz en el núcleo de la fibra estará en el rango de $\text{W}/\mu\text{m}^2$, potencias para las cuales los efectos no lineales se vuelven relevantes [29].

Los efectos no lineales pueden dividirse en tres grandes clases: el primer tipo de efectos son donde no se presenta transferencia de energía entre el campo óptico y el medio dieléctrico, donde se presenta un cambio en el índice de refracción del material debido a cambios en la intensidad de la señal. Los efectos principales en esta clase son el SPM (*Self-Phase Modulation*), XPM (*Cross Phase Modulation*) y FWM (*Four-Wave Mixing*). La segunda clase de efectos no lineales describe la interacción no lineal entre la señal y el ruido, mientras que la tercera clase se conoce como los efectos debidos a procesos resonantes, donde existe transferencia de energía entre el campo óptico y el medio dieléctrico, siendo el efecto SRS (*Stimulated Raman Scattering*) y el SBS (*Stimulated Brillouin Scattering*) los efectos más relevantes [29].

A continuación se introduce los principales efectos no lineales:

SPM (*Self-Phase Modulation*): El cambio no lineal en el índice de refracción causa un cambio no lineal de fase que depende de la intensidad de la señal. La forma de mitigar este efecto no lineal es controlar la potencia de salida de los canales.

XPM (*Cross Phase Modulation*): Describe un cambio no lineal de fase que depende de la intensidad de una señal en una longitud de onda adyacente. La forma de mitigar este efecto no lineal es aumentar la separación de los canales en un sistema DWDM y limitar la potencia de salida por canal.

FWM (*Four-Wave Mixing*): Es un proceso paramétrico no lineal que envuelve la interacción entre cuatro señales ópticas, donde dos o tres fotones son aniquilados y nuevos fotones son creados en diferentes frecuencias con el fin de que el momento y la energía total se conserven. La forma de mitigar el FWM es utilizar separación variable entre portadoras y trabajar con dispersión en la fibra para evitar el casamiento de fases entre portadoras ópticas, lo cual reduce sensiblemente el FWM..

Resumen

Con los análisis presentados en este capítulo, es posible definir los siguientes parámetros de red:

- Separación entre nodos amplificadores dependiendo del tipo de fibra, número de canales y potencia de transmisión por canal dada por el presupuesto de potencia óptico.
- Características de los amplificadores ópticos requeridos para cumplir con una relación señal a ruido determinada.
- Tasa de bit y distancia máxima que pueden ser implementadas en un enlace determinado, considerando las limitaciones de potencia de salida dada por los efectos no lineales, de relación señal a ruido dada por la tasa de bit y formato de modulación usado y de dispersión cromática y PMD dado por el tipo de fibra y por el tipo de red (coherente o compensada).
- Parámetros de ingeniería necesarios para no despertar efectos no lineales en la fibra.

5. Definición de Arquitecturas de Transporte

En el capítulo anterior se definieron las restricciones y parámetros a nivel de diseño analizando cada uno de los efectos y limitaciones del medio de transporte. En este capítulo se presentan las arquitecturas de red y los requerimientos a nivel de ancho de banda y latencia de los escenarios de transporte de las redes de próxima generación, como es el caso de las redes de interconexión de *data centers* y las redes de *backhaul/fronthaul* de redes móviles 5G.

5.1. Redes WDM Compensadas/Coherentes/Híbridas

Las arquitecturas de red de transporte se pueden dividir en tres categorías dependiendo de la tasa de bit que soporta cada canal y de su estrategia de compensación de dispersión. Estas son: las redes compensadas, las redes coherentes y las redes híbridas.

Las redes compensadas fueron diseñadas para soportar canales con tasas de bit de 10Gb/s, los transmisores utilizan modulación OOK y receptores basados en detección directa, los cuales son incapaces de detectar y compensar los efectos lineales como la dispersión cromática o la dispersión por modo de polarización, por lo tanto, es necesario incluir compensadores para este tipo de efectos.

Los compensadores de dispersión cromática tienen pérdidas de inserción asociadas, por lo que se debe de tener cuidado con la ubicación de estos elementos para que no tenga incidencia en el presupuesto de potencia del sistema, por esta razón, es común encontrar compensadores de dispersión instalados en la recepción de cada tramo y haciendo uso de amplificadores de doble etapa, que están diseñados para compensar las pérdidas de inserción de este tipo de elementos pasivos como se muestra en la Figura 6-2. A la hora de realizar el diseño de una red compensada, se debe conocer el tipo de fibra y la longitud del enlace o preferiblemente conocer el valor exacto de dispersión cromática del enlace, lo cual se puede medir por medio de una caracterización con equipos especializados. O haciendo un cálculo sencillo, incluyendo PMD si fuera el caso.

En la Figura 4-5 se muestra un sistema DWDM compensado en topología punto a punto, el cual usa amplificadores EDFA simples en transmisión y doble etapa en recepción con el fin de mitigar las pérdidas de inserción de los compensadores de dispersión. Se considera fibra óptica estándar G.652 con dispersión de 17 ps/nm/km y tramos de 100km entre nodos amplificadores.

Al momento de aumentar la tasa de bit de los transmisores de 10Gb/s a 40Gb/s usando transmisores OOK y receptores con detección directa, factores como PMD y dispersión cromática y el alto requerimiento de OSNR se presentaron como una limitación importante para ser transmitidas por medio de un sistema que ya había sido diseñado para señales a 10Gb/s. Adicionalmente, como el transmisor usaba modulación OOK (tasa de 1 bit por baudio), se requería electrónica que trabajara como mínimo a 40Gbaud, lo cual en su momento tenía baja disponibilidad tecnológica. Por esta razón, se adoptaron esquemas de modulación multinivel que permitieran manejar grandes tasas de bit con electrónica tradicional ya desarrollada para sistemas a 10Gb/s. La tecnología adoptada para este fin

fue QPSK, por lo tanto fue necesario migrar los receptores basados en detección directa a receptores basados en receptores coherentes.

Estos avances en las arquitecturas de los transmisores y receptores prepararon los sistemas no solo para el transporte de canales a 40Gb/s, sino para un futuro transporte de señales de mayor tasa de bit usando modulaciones de fase y cuadratura, ya que al detectar la fase, amplitud y polarización de la señal, los efectos lineales como dispersión cromática y PMD se compensaron usando técnicas de procesamiento digital de señales, evitando el uso de compensadores de dispersión que aumentaban la latencia, los requerimientos de amplificación del sistema de transmisión. Este tipo de sistemas se conoce como sistema coherente.

Las redes coherentes permitieron aumentar de manera significativa la capacidad total de los sistemas DWDM al permitir transmitir por el mismo canal de 100GHz o 50GHz mayores tasas de bit sin tener que preocuparse por los efectos lineales como PMD o dispersión cromática, al tener formatos de modulación de orden superior, la distancia entre símbolos es menor que en el caso de la modulación OOK y el requerimiento de relación señal a ruido aumenta a medida que se aumenta la tasa de bit o la distancia euclidiana entre los símbolos de la constelación de la modulación considerada. En la referencia [53] se puede encontrar más detalles sobre los requerimientos de este tipo de sistemas.

Tabla 5-1. Requerimientos de OSNR para modulaciones de nivel superior.

Modulation	QPSK	16QAM	16QAM	8QAM	QPSK	QPSK
Overall Data Rate (Gb/s)	100	400	400	400	400	400
Symbol Rate (Gbaud) with FEC	32	32	64	43	64	32
Number of sub-channels	1	2	1	2	2	4
Nyquist filtering	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Data rate per sub-channel (Gb/s)	100	200	400	200	200	100
Channel occupancy (GHz)	50	75	75	100	150	150
SE (bit/s/Hz)	2	5.33	5.33	4	2.66	2.66
Required OSNR at BER=10 ⁻²	12.5	19.5	22.5	18.5	13.4	12.5
Maximum transmission reach* (km)	~2000	~400	~200	~500	~600	~2000
HW implementation penalty		++	+++	+++	++	+

Un factor importante en el diseño de redes coherentes, es que la potencia de salida por canal es menor para transmitir un canal a 100Gb/s que para un canal a 10Gb/s, ya que los efectos no lineales como SPM, XPM y FWM son más notorios para canales con mayor tasa de bit, por lo tanto se debe disparar el canal con menor potencia para evitar la aparición de efectos no lineales que degraden el desempeño del sistema. Esta limitación implica tener amplificadores ubicados a una menor distancia, lo cual aumentará el número de nodos de la red impactando directamente en la inversión inicial y en los costos operacionales del sistema. Otra forma de viabilizar las redes coherentes manteniendo la misma infraestructura desarrollada para las redes compensadas es el uso de esquemas de amplificación distribuidos, como es el caso de amplificadores Raman para relajar los requerimientos de

potencia de salida de los amplificadores EDFA manteniendo la misma distancia entre nodos.

Las redes híbridas permiten transmitir canales tanto a 10Gb/s con modulación OOK como canales de tasa de bit mayor a 10Gb/s con modulaciones en fase y cuadratura de manera simultánea. El diseño de este tipo de redes es el más exigente, ya que se debe diseñar el sistema para compensar la dispersión cromática de los canales con detección directa y limitar la potencia de salida de los canales y utilizar esquemas de amplificación distribuida para fijar la potencia de salida por canal en el valor recomendado para canales a 100Gb/s.

5.2. Redes WDM Estáticas / Dinámicas

Las redes de transporte se pueden clasificar con respecto a su flexibilidad de aprovisionamiento de nuevos servicios y en su capacidad de restauración en redes estáticas y redes dinámicas.

La tecnología DWDM tradicionales permiten agregar múltiples señales en un solo par de hilos de fibra, agregar amplificadores para aumentar la distancia de transmisión y realizar agregación, desagregación y enrutamiento de tráfico por medio de OADMs o WSS, sin embargo, las decisiones de protección o restauración en caso de falla se deja normalmente en manos de elementos de capa superior en el modelo OSI como es el caso de *switches* o enrutadores de capa 2 o capa 3, así pues, este tipo de red es posible considerarla como una red estática.

Con la evolución de los requerimientos de las redes de transporte este panorama fue cambiando, a medida que los transmisores y receptores evolucionaron para soportar señales de más capacidad, cada servicio o longitud de onda se convierte en un servicio crítico para la operación del cliente final, por lo que los operadores invierten en mejorar su infraestructura para tener caminos ópticos alternos y mantener unos acuerdos de nivel de servicio de acuerdo con el requerimiento del mercado, lo que a su vez ponía presión en las redes de transporte, ya que la implementación de protecciones basadas en redes estáticas es bastante costosa, dado que se debe desagregar tráfico en todos los puntos donde se debe tomar una decisión sobre el enrutamiento de la señal.

Por lo tanto fueron implementadas funcionalidades de protección y restauración en los *transponders* y en los nodos ROADM para permitir realizar el enrutamiento de la señal por múltiples caminos de fibra manteniendo solamente los elementos activos en los extremos del enlace o en donde fuera necesario regenerar la señal. Inicialmente, esquemas ASON/GMPLS fueron integrados para darle una mayor inteligencia a la red de transporte, actualmente, se están desarrollando soluciones basadas en SDN para redes de transporte [54].

5.3. *Backhaul* / *Fronthaul* de redes móviles de próxima generación

A medida que los requerimientos de ancho de banda por usuario aumenta, el ancho de banda que debe tener disponible un nodo o celda que presta servicios a múltiples usuarios también debe aumentar. Se define *backhaul* como la conexión entre el elemento que se encarga del procesamiento y de la asignación de recursos de banda base (BBU) y los

elementos de core como RNC/BSC (ver Figura 5-1). Para redes de próxima generación, el elemento de procesamiento banda base se consolida en un punto central (*BBU pool*) que se conecta a su vez a múltiples nodos con el fin de optimizar la asignación de recursos en la red, por lo tanto se crea una nueva interfaz conocida como *fronthaul* entre el *BBU pool* y los diferentes nodos (ver Figura 5-2).

Las arquitecturas de la red de acceso de radio (RAN) para las tecnologías 2G/3G y 4G se presentan en la Figura 5-1. En las tecnologías 2G y 3G, aun en uso, los nodos terminales (BTS (2G)/*NodeB* (3G)) se conectan a los elementos controladores de la red de acceso correspondiente a cada tecnología (BSC (2G)/RNC (3G)) por medio de las interfaces Abis (2G) y IuB (3G) y los controladores se conectan por medio de interfaces propietarias (A,Gb(2G) y IuCs,IuPs(3G)) a los elementos de *core* [55]. La tecnología 4G/LTE presentó en su momento una evolución al eliminar de la topología los controladores de red de acceso, interconectando directamente los nodos terminales (eNodeB) con los elementos de *core* y creando una conexión entre nodos terminales por medio de interfaces propietarias (S1 y X2 respectivamente) [55]. Las tecnologías y arquitecturas de redes móviles hasta cuarta generación, presentan cambios significativos en las técnicas de acceso al medio, técnicas de modulación, protocolos de señalización con el fin de aumentar el número de usuarios y el ancho de banda por usuario. A nivel de red de transporte, para las tres generaciones de tecnologías, el requerimiento es similar, comunicar el nodo terminal con un elemento controlador o directamente con un equipo de *core*, por lo tanto, al evolucionar las tecnologías de redes móviles, también es previsible que puedan cambiar las tecnologías y protocolos usados en el *backhaul* de acuerdo a los requerimientos de ancho de banda latencia, pero las arquitecturas de transporte no presentan mucha variación. [56]

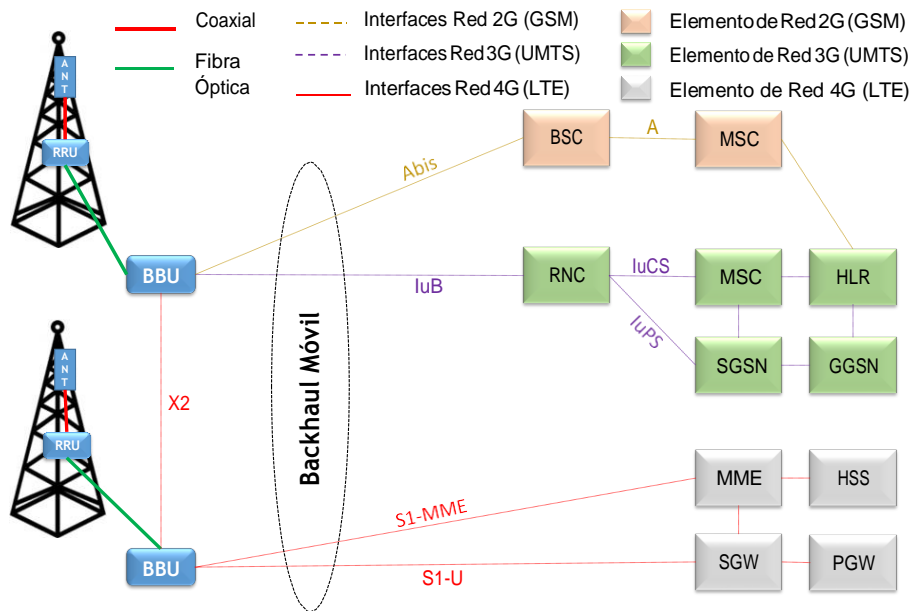


Figura 5-1. Arquitectura de redes móviles 2G/3G/4G.

De acuerdo con la Figura 5-1, en las redes 2G/3G/4G, los requerimientos de red de transporte se concentraban en los requerimientos del *backhaul*, sin embargo, la red de acceso móvil presenta una evolución en la arquitectura de las estaciones base, la cual se muestra en la Figura 5-2. [57] La arquitectura tradicional de las estaciones base consta de un módulo normalmente ubicado en la parte inferior de la torre que realiza procesamiento en banda base y adapta la señal digital de información para ser transmitida por la antena hacia los usuarios finales. La conexión entre la estación base y la antena se realiza por medio de un cable coaxial [57]. El siguiente paso en la evolución de estas redes es la división de la estación base en dos partes: la BBU (*Base Band Unit*), encargada de realizar el procesamiento en banda base, asignación de recursos, etc y la RRU (*Radio Remote Unit*), encargada de adaptar la señal banda base para conectarla a la antena.

La conexión entre la BBU y la RRU se realiza por medio de fibra óptica multimodo, reemplazando de esta forma la conexión por coaxial debido a su alto costo y altas pérdidas de inserción, mientras que el protocolo de comunicación es el protocolo CPRI (*Common Primary Radio Interface*). La arquitectura basada en BBU y RRU es la arquitectura predominante en las redes actuales. Con el fin de optimizar la asignación de recursos, ya que todas las estaciones base no presentan la misma demanda de tráfico, las BBU de un conjunto de nodos cercanos fueron centralizadas y conectadas a las diferentes RRU por medio de fibra óptica. Esta arquitectura se conoce como *Cloud-RAN* (C-RAN) [57].

Los requerimientos de las redes de transporte requeridas en las tecnologías 2G/3G y 4G solo debían tener en cuenta las interfaces del *backhaul*, las cuales consisten en el transporte de protocolos de capa 2 como Ethernet o SDH con diversos requerimientos de ancho de banda y latencia. Sin embargo, la arquitectura *Cloud-RAN* mostrada en la Figura 5-2, aumenta la complejidad de las arquitecturas de transporte tradicionales al agregar el *fronthaul* (Conexiones entre las RRU y *BBU pool*), interfaz en la cual se transportan protocolos con estrictos requerimientos de latencia como es el caso de CPRI (*Common Primary Radio Interface*). Según la referencia [57], hasta el 2014 solo el 35% de las estaciones base estaban conectadas a través de fibra, 55% por medio de enlaces de microondas y el 10% restante por medio de par de cobre, debido al crecimiento de la infraestructura de fibra óptica dentro de las ciudades impulsada por tecnologías como FTTH, los requerimientos de disponibilidad, ancho de banda y la posibilidad de transmitir señales análogas sobre la fibra óptica (protocolo CPRI), hacen de la fibra la solución de capa física prominente para este tipo de arquitecturas de transporte [57].

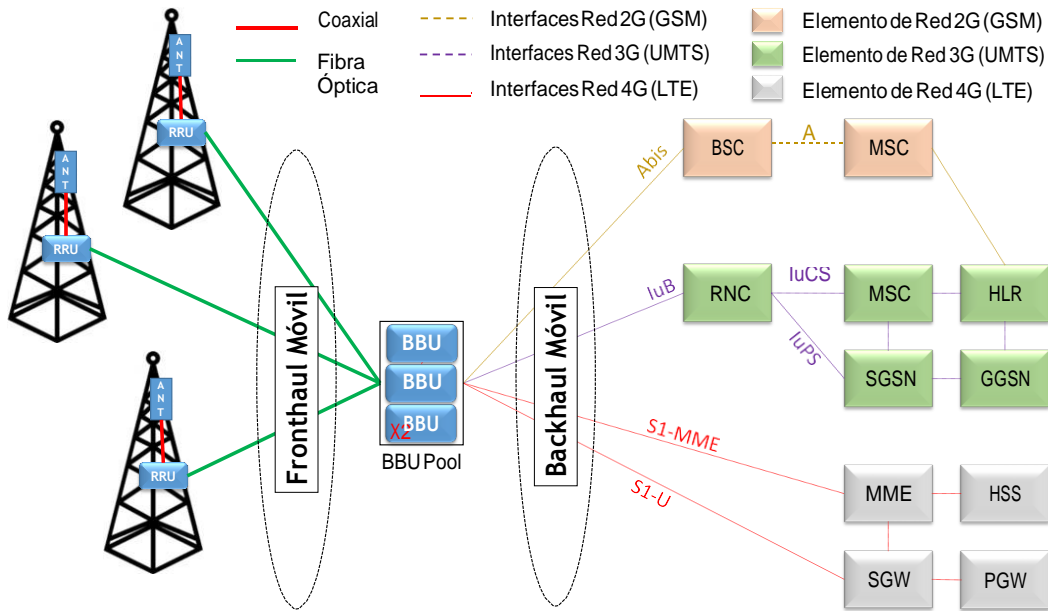


Figura 5-2. Evolución en las arquitecturas de las estaciones base.

Por su parte, las arquitecturas de red 5G se encuentran en proceso de definición, aunque se espera que la arquitectura de red de acceso se base en redes heterogeneas compuestas por nodos de menor tamaño y menor potencia conocidas como *Small Cells* en conjunto con celdas Macro con arquitectura *C-RAN*. Debido a esto, uno de los principales retos para el despliegue de las redes 5G, las cuales están llamadas a soportar el tráfico generado por el Internet de las cosas y los nuevos servicios y aplicaciones basados en la nube, es encontrar una arquitectura de red de transporte capaz de soportar los diversos protocolos, topologías, distribuciones de tráfico y anchos de banda requeridos, los cuales se muestran en la Figura 5-3 [58].

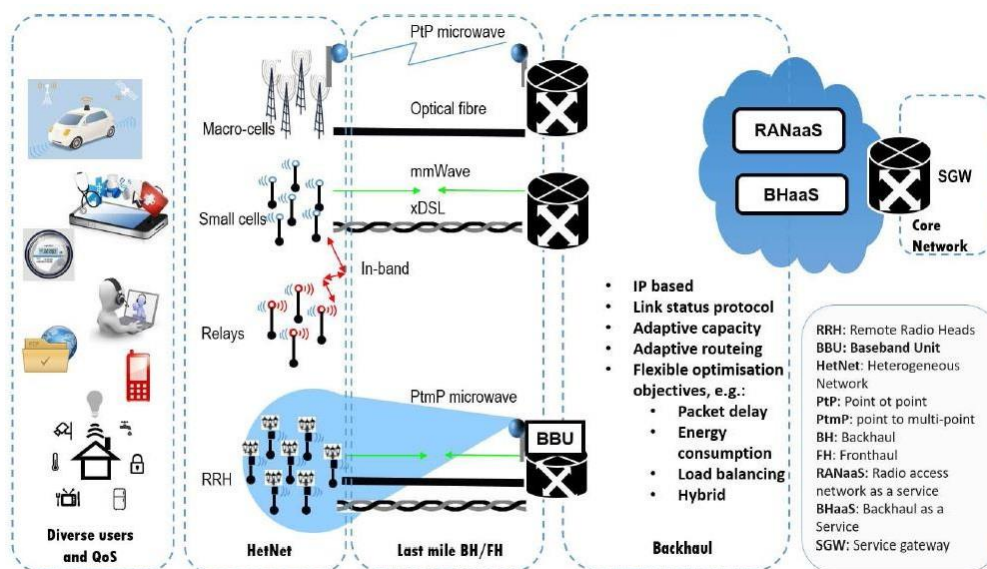


Figura 5-3. Redes Heterogeneas y backhaul con múltiples dispositivos y aplicaciones. Tomada de [58]

5.4. Redes de Interconexión de *Data Centers*

Un *datacenter* es una instalación empleada para albergar múltiples racks que contienen servidores, como por ejemplo servidores web, servidores de aplicaciones o servidores de bases de datos, los cuales están conectados a través de una red de interconexión y son los responsables por direccionar o procesar los requerimientos de información solicitados por un usuario [59].

En la Figura 5-4 se muestra la arquitectura actual de las redes de *data centers*, donde los *switches* de contenido son los encargados de direccionar el requerimiento al servidor apropiado, el cual se encuentra en cierto *rack* que posee un *switch* en la parte superior encargado de la comunicación entre servidores de diferentes *racks* y con los elementos de agregación de la topología. Este *rack* es conocido como ToR switch (*Top of the Rack Switch*), el cual posee interfaces a 1Gbits/s para la interconexión entre los ToR de diferentes *racks* e interfaces a 10Gbits/s para la interconexión con los elementos de agregación, los que a su vez se conectan con los elementos de core por medio de interfaces a 10Gb/s y a 100Gb/s [59].

Las topologías presentadas son escalables en capacidad y son diseñadas para soportar fallas de conexiones o de equipos, no obstante, el alto consumo de potencia y los requerimientos de refrigeración presentan el mayor porcentaje en el costo de un *datacenter*, cuya causa principal es el consumo energético de los equipos de aire acondicionado con un 50% [60], mientras que los *switches* electrónicos y conversores electro-ópticos usados para las conexiones son otro factor importante. Debido a la creciente demanda de contenido y el crecimiento de la cantidad de servidores consecuente, la optimización del consumo eléctrico y requerimiento de conexiones de alta velocidad entre los servidores de la arquitectura seleccionada requieren tecnologías de conmutación y comunicación totalmente ópticas.

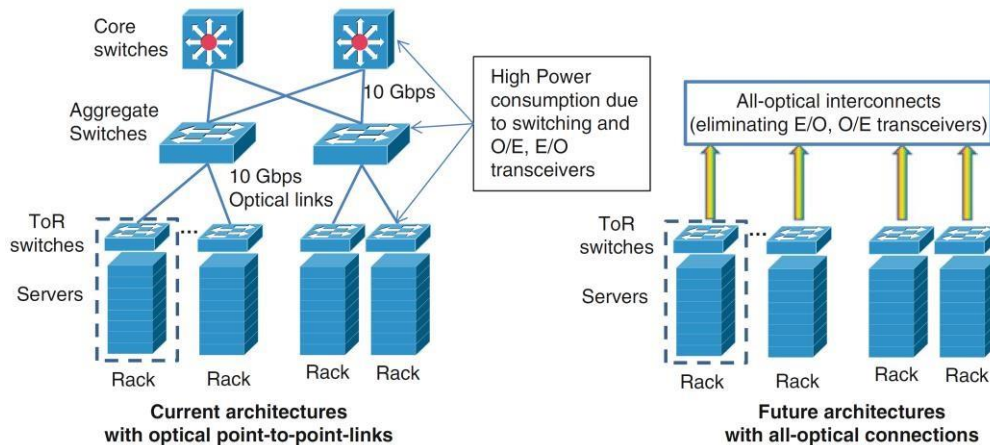


Figura 5-4. Arquitectura actual de las redes de data centers. Tomada de [59]

Las empresas de contenido como Google, Facebook, Microsoft, Amazon, entre otras, son las empresas que mayor cantidad de centros de datos tienen a nivel mundial, ya que en estos centros es donde almacenan el contenido de sus páginas web y aplicaciones. Los centros de datos están ubicados estratégicamente en ciudades de fácil salida hacia cables

submarinos y con grandes poblaciones. A medida que aumenta el nivel de penetración de internet en países del tercer mundo y aumenta la cantidad de usuarios de servicios móviles que requieren conexiones de alta capacidad, los centros de datos van aumentando sus necesidades de almacenamiento, procesamiento e interconexión con el fin de cubrir la demanda de tráfico actual. Los operadores de contenido están por lo tanto, ante una decisión importante, aumentar la capacidad de sus centros de datos, lo cual conlleva a un aumento en el consumo de potencia, o llevar el contenido cada vez más cerca del usuario final implementando centros de datos de menor tamaño e implementando redes de interconexión de alta capacidad y baja latencia con el fin de prestar un mejor servicio al usuario final. Debido a esta necesidad, emerge el mercado de DCI (*Data Center Interconnection*), donde se requieren conexiones de alta capacidad, escalabilidad y baja latencia y consumo eléctrico entre centros de datos separados desde algunas decenas de kilómetros (Metro DCI) hasta distancias del orden de 10.000km (Conexión hacia los Macro *Data Center* por medio de cables submarinos). En la Figura 5-5 se muestra la evolución de los requerimientos de transmisión entre centros de datos desde 2016 hasta 2021.

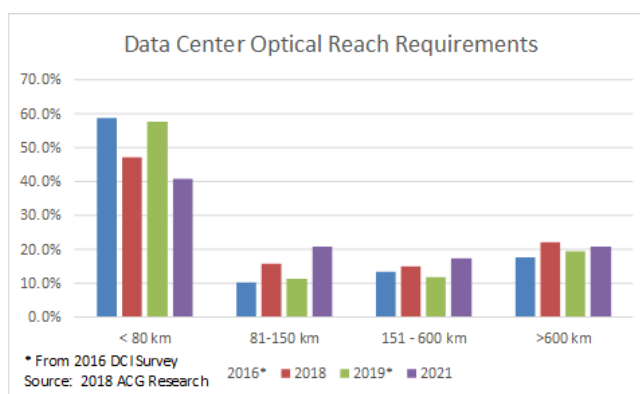


Figura 5-5. Evolución de las distancias de conexión inter-data center. Tomada de [61]

Los requerimientos de escalabilidad, bajo consumo y baja latencia convierten a WDM en la tecnología preferida para implementar las redes de interconexión de *data centers*. Debido a los cambios en la ubicación de los centros de datos, la arquitectura de las redes de transporte en internet está cambiando drásticamente y tecnologías como WDM, que antes eran consideradas puramente de transporte, están migrando hacia redes metropolitanas. Según la Figura 5-6, el mercado de los equipos WDM esa aumentando de manera significativa para entornos metropolitanos y teniendo un aumento menos pronunciado en los entornos de larga distancia. Por otro lado se nota una disminución de las redes SONET/SDH, lo cual se esperaba por la aparición de las redes OTN/DWDM.

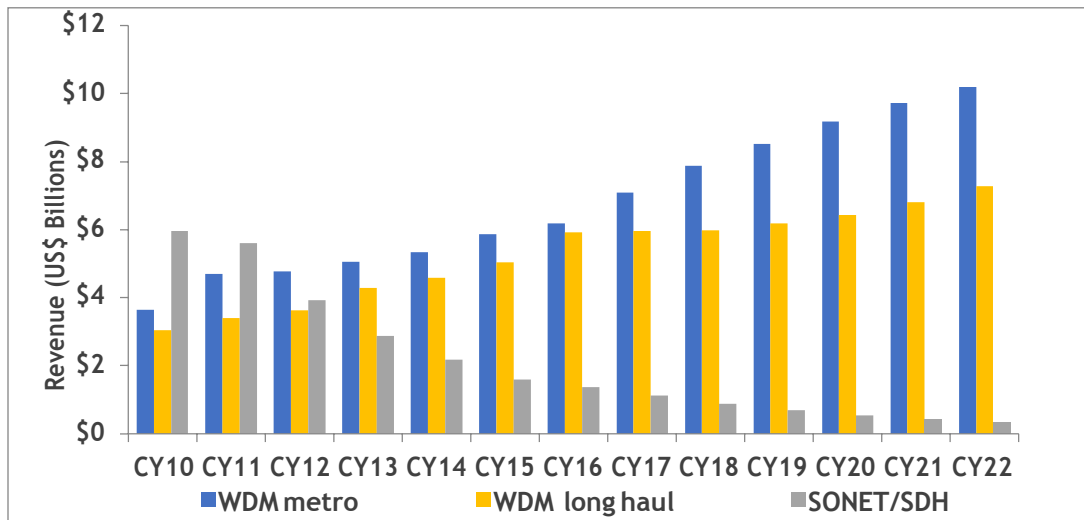


Figura 5-6. Pronóstico de Mercado de equipos de Comunicaciones ópticas (2017-2022). Tomada de [62]

Cuando se habla sobre *data centers* o redes de interconexión de *data centers*, es común encontrarse en la literatura con los niveles de centros de datos o los niveles de *carriers*. Es necesario tener claridad sobre este tema, ya que los centros de datos de diferentes niveles son interconectados por empresas con infraestructura de fibra óptica, conocidas como *carriers*, que a su vez tienen ciertos niveles.

Con respecto a los niveles de los *data centers*, el estándar ANSI TIA-942-A tiene como objetivo definir los requerimientos y pautas para el diseño e instalación de un centro de datos o una sala de computación [63]. Según el estándar, se definen varios esquemas o niveles que buscan aumentar la confiabilidad del centro de datos, donde se miden parámetros a nivel de telecomunicaciones, eléctricos, mecánicos, arquitectónicos y estructurales. Los requerimientos a nivel de telecomunicaciones de los cuatro niveles son los siguientes:

Data Center nivel 1 (Tier 1): Este tipo de centro de datos es susceptible a caídas de servicios por actividades planeadas y no planeadas, presenta múltiples puntos de fallas simples y debe ser apagado para realizar mantenimientos y reparaciones. Sus elementos de telecomunicaciones y eléctricos no tienen redundancia.

Data Center nivel 2 (Tier 2): Este tipo de centro de datos tiene componentes redundantes. A nivel de telecomunicaciones debe tener componentes redundantes en los componentes críticos como procesadores o tarjetas de alimentación.

Data Center nivel 3 (Tier 3): A nivel de telecomunicaciones debe tener por lo menos dos proveedores de telecomunicaciones independientes cada uno con rutas de fibra totalmente independientes.

Data Center nivel 4 (Tier 4): A nivel de telecomunicaciones debe tener total redundancia entre cualquier conexión interna o externa, así como funcionalidades de *backup* automático y redundancia total de equipos con el fin de mantener su operación ante la caída total de cualquier equipo de la arquitectura.

Existen requerimientos a nivel eléctrico, mecánico, estructural y arquitectónico para cada uno de los niveles, para mayor detalle consultar la referencia [63].

Con respecto a los niveles de *carriers*, como son conocidas las empresas que prestan servicios de conectividad de datos, se tienen los siguientes niveles [64]:

Carriers nivel 1 (Tier 1): son empresas de gran tamaño, que son dueñas y operan redes robustas, de gran cobertura, los cuales pueden proveer enrutamiento hacia cualquier red en internet sin costos adicionales. Los *carrier Tier 1* mantienen acuerdos recíprocos y libres de tarificación (*peering*) con otros *carriers* del mismo nivel.

Carriers nivel 2 (Tier 2): son proveedores de servicios de gran tamaño enfocados en regiones específicas, los cuales mantienen acuerdos de *peering* con otros *carriers* pero deben pagar el tráfico de datos que pasa por las redes de nivel 1.

Carriers nivel 3 (Tier 3): Son empresas pequeñas y especializadas en ciertos segmentos de usuario final, como conectividad corporativa y *data centers*. Los *carrier Tier 3* compran el acceso a internet de otras empresas *Tier 2* y *Tier 1*.

Existen distintos requerimientos de latencia, ancho de banda y tiempos de restauración para mantener acuerdos de nivel de servicio dependiendo del nivel de *data center* que se vaya a interconectar. En la referencia [65] se presentan los requerimientos, tipos de aplicaciones, tecnología de interconexión y la distancia estimada para la conexión entre cada nivel de *data center*.

Tabla 5-2. Requerimientos y tecnologías óptimas para DCI.

<u>Nivel DC</u>	<u>Requerimientos</u>	<u>Aplicaciones Típicas</u>	<u>Tecnología</u>
Tier 1	Latencia < 5ms	Aplicaciones Síncronas	WDM
	Restauración < 50ms	Metro regional < 150km	
	Ancho de Banda ≤ 200Gbps	Entrega de contenido y video. sincronización de caché	
Tier 2	Latencia < 50ms	Aplicaciones Síncronas y Asíncronas	WDM Conectividad Capa 2 Transporte Carrier Ethernet
	Restauración < 50ms	Metro, regional o nacional > 150km	
	Ancho de Banda ≤ 100Gbps	Agregación de ancho de banda (<i>data center consolidation</i>)	
Tier 3	Latencia < 50ms	Aplicaciones Síncronas y Asíncronas	Transporte Carrier Ethernet Capa 2
	Restauración < 50ms	Metro, regional or national < 2000km	
	Ancho de Banda ≤ 20Gbps	Replicación de bases de datos	
Tier 4	Latencia < 100ms	Aplicaciones Asíncronas	Capa 2 Ethernet, Capa 3 IP VPNs
	Restauración < 100ms	Metro, regional, nacional o global	
	Ancho de Banda ≤ 10Gbps		

Información adaptada de la referencia [65]

El grupo de trabajo de la IEEE 802.3 define los requerimientos de interconexiones dentro de un *data center* entre *carriers Tier 1* y *Tier 2* con una distancia menor a 600 metros usando considerando interfaces PSM4 o CWDM para tasas de 100Gb/s y DR4/FR4 para conexiones a 400Gb/s, mientras que define los requerimientos de capacidad para conexión inter *data center* en 4Tb/s para interfaces 100G (PAM4) y 16Tb/s para interfaces 400G (400ZR) como se muestra en la Figura 5-7 [66][67].

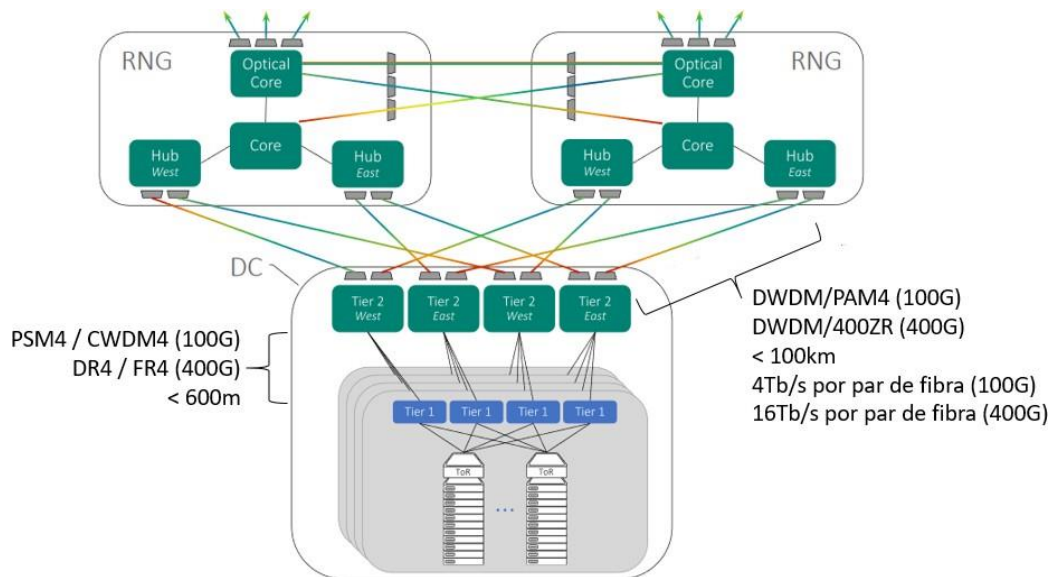


Figura 5-7. Arquitectura regional de conexión inter data center. Tomada de [66]

Resumen

En este capítulo se da una breve descripción de las arquitecturas compensadas, coherentes e híbridas y sus implicaciones a nivel de latencia y de crecimiento. También se presentan los requerimientos a nivel de ancho de banda y latencia de las redes de interconexión de data centers y las arquitecturas de backhaul/fronthaul móvil para redes móviles de próxima generación, donde se ve la necesidad de utilizar tecnologías ópticas para minimizar la latencia y optimizar el uso del espectro óptico para aumentar la capacidad total del sistema.

6. Análisis Económico

Desde el punto de vista de los operadores, al momento de seleccionar una tecnología o arquitectura, uno de los principales factores a evaluar es el presupuesto del que debe disponer al momento de realizar una compra y al momento de operar la red. Estos valores junto con su estrategia comercial definirán el modelo de negocio de la empresa, en el cual se estimara un tiempo de retorno de inversión determinado y será el factor determinante a la hora de tomar una decisión de inversión.

Con el fin de evaluar el costo total de la red, también conocido como TCO, se deben tener en cuenta los costos de compra e implementación de la tecnología seleccionada, lo cual se conoce como Capex y los costos de operación y mantenimiento, también conocidos como

Opex. [68] El Opex representa normalmente un porcentaje alto del TCO, a pesar de ello, el Capex representa la inversión inicial que debe realizar el operador para viabilizar el proyecto. Con el fin de minimizar la inversión inicial requerida, se posible buscar fuentes de financiación con entidades bancarias o empresas de inversión en proyectos tecnológicos, o por otro lado, los mismos proveedores de tecnología deben adaptarse a modelos de negocios basados en Opex con el fin de reducir la cantidad de inversión inicial y permitir al operador desplegar su red y obtener un retorno capital y de esta forma viabilizar los proyectos.

En este capítulo se proponen diferentes configuraciones de nodos de amplificación, de agregación estático y agregación dinámico para cumplir con los requerimientos y arquitecturas presentadas en el análisis técnico. La configuración de cada uno de los escenarios se realiza siguiendo los parámetros de diseño de la Tabla 3-5 y basadas en mi experiencia como diseñador de redes de transporte basada en tecnología DWDM/OTN

6.1. Configuración nodos capa óptica

Se consideran tres tipos de nodos en el análisis propuesto, un nodo amplificador, encargado de mantener los niveles de potencia recomendados para optimizar la relación señal a ruido del sistema y el cual no tiene posibilidad de desagregar tráfico de ningún tipo, un nodo de agregación estático, el cual permite desagregar canales usando elementos pasivos de forma estática y nodos de agregación dinámicos, los cuales permiten desagregar tráfico sin ningún tipo de bloqueo o restricción y permiten implementar arquitecturas CDC (*Colorless Directionless Contentionless*) y *Flexgrid* en la red.

6.1.1. Nodo Amplificador

Los nodos o sitios amplificadores son considerados para enlaces de larga distancia donde no se requiera agregar o desagregar tráfico en el momento inicial de la implementación de la red. Este nodo es encargado de compensar las pérdidas de inserción provocadas por la fibra óptica y por los elementos adicionales ubicados en el enlace, como divisores, acopladores o compensadores. El esquema general para un nodo amplificador se presenta en la Figura 6-6, donde se consideran amplificadores EDFA en transmisión y recepción, amplificadores Raman en transmisión y recepción, compensadores de dispersión en recepción y un elemento pasivo para agregar y desagregar el canal de servicio.

Dependiendo del tipo de red, de las condiciones del medio de transmisión, del número de canales que debe soportar y de la tasa de bit diseñada para cada canal, se consideran los siguientes escenarios:

- A) Amplificación EDFA Rx/Tx para redes coherentes: Se hace uso de un amplificador EDFA en cada sentido de transmisión, sin uso de compensadores de dispersión al tratarse de una red coherente. El esquema propuesto se presenta en la Figura 6-1.

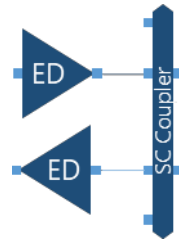


Figura 6-1. Esquema de amplificación EDFA en transmisión y recepción para redes coherentes.

- B)** Amplificación EDFA Rx/Tx para redes compensadas: Al tratarse de una red compensada, se deben agregar compensadores de dispersión cromática, los cuales presentan una pérdida de inserción que puede afectar el presupuesto de potencia del sistema, en consecuencia, para este tipo de esquemas es común utilizar amplificadores de doble etapa para compensar las pérdidas adicionales insertadas por el compensador de dispersión. El esquema propuesto se presenta en la Figura 6-2.

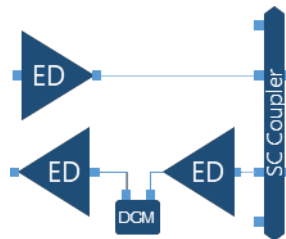


Figura 6-2. Esquema de amplificación EDFA en transmisión y recepción para redes compensadas.

- C)** Amplificación EDFA Rx/Tx + RAMAN Rx para redes coherentes: Para enlaces que superen la atenuación de referencia para amplificación EDFA, se implementan amplificadores RAMAN en recepción. Como se trata de un esquema coherente, no se usan compensadores de dispersión. El esquema propuesto se presenta en la Figura 6-3.

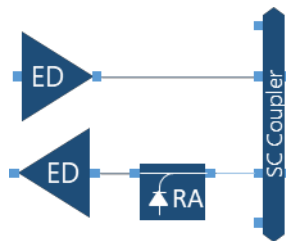


Figura 6-3. Esquema de amplificación EDFA en transmisión y EDFA / RAMAN en recepción para redes coherentes.

- D)** Amplificación EDFA Rx/Tx + RAMAN Rx para redes compensadas: Esquema similar a la opción C pero agregando compensadores de dispersión en la recepción. Debido a que el compensador de dispersión tiene pérdidas de inserción, se propone un esquema de amplificación EDFA dual para no afectar el presupuesto de potencia. El esquema propuesto se presenta en la Figura 6-4.

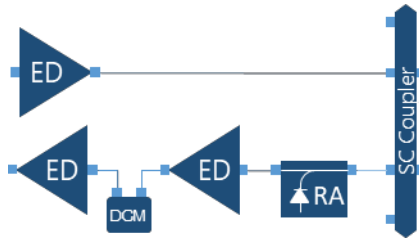


Figura 6-4. Esquema de amplificación EDFA en transmisión y EDFA / RAMAN en recepción para redes compensadas.

- E) Amplificación EDFA Rx/Tx + RAMAN Rx/Tx para redes coherentes: Para enlaces que superen la atenuación de referencia para amplificación EDFA y RAMAN en recepción, se implementan amplificadores RAMAN en transmisión. Como se trata de un esquema coherente, no se usan compensadores de dispersión. El esquema propuesto se presenta en la Figura 6-5.

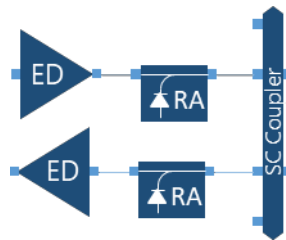


Figura 6-5. Esquema de amplificación EDFA / RAMAN en transmisión y EDFA / RAMAN en recepción para redes coherentes.

- F) Amplificación EDFA Rx/Tx + RAMAN Rx/Tx para redes compensadas: Esquema similar a la opción E pero agregando compensadores de dispersión en la recepción. Debido a que el compensador de dispersión tiene pérdidas de inserción, se propone un esquema de amplificación EDFA dual para no afectar el presupuesto de potencia. El esquema propuesto se presenta en la Figura 6-6.

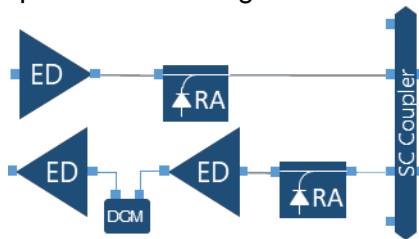


Figura 6-6. Esquema de amplificación EDFA / RAMAN en transmisión y EDFA / RAMAN en recepción para redes compensadas.

6.1.2. Nodo Agregación Estático

El esquema de transmisión considerado para el nodo de agregación estático se presenta en la Figura 6-7. Consiste en elementos de capacidad o *transponders* encargados de agregar tráfico de menor capacidad y adaptar la señal compuesta para ser transmitida por

un sistema WDM, seguidos de un multiplexor encargado de agregar las diferentes señales para ser transmitidos por un par de hilos de fibra óptica y seguido de amplificadores ópticos encargados de compensar las pérdidas de inserción del multiplexor y adaptar la señal WDM compuesta para soportar la transmisión a larga distancia. En la Figura 6-8 y la Figura 6-9 se presentan las arquitecturas para grados superiores, entendiendo como grado la cantidad de pares de hilos de fibras ópticas que llegan o parten del nodo. Los esquemas de amplificación pueden variar dependiendo de la longitud del enlace de fibra, teniendo como opciones los esquemas presentados en la sección anterior opciones A-F.

Los esquemas presentados en la Figura 6-7, Figura 6-8 y Figura 6-9 tienen como ventaja que permiten agregar o desagregar el total de los canales que componen el sistema WDM, por lo tanto la capacidad del nodo será igual a la capacidad máxima para la cual el sistema fue diseñado, sin embargo, si la matriz de tráfico presenta canales que no necesariamente deban ser desagregados en un nodo de este tipo, se hace necesario agregar transponders en configuración *back to back* para direccionar el canal en otra dirección o realizar *bypass* físicos entre los puertos de los multiplexores, lo cual puede llevar a problemas de diferencia de potencia entre los canales que se desagregan y los canales que realizan *bypass*, afectando la ecualización de la red.

Con el fin de evitar el uso de *bypass* físicos en la red, es posible agregar un OADM, el cual permite agregar y desagregar una cantidad específica de canales y permitir el paso transparente de un grado a otro. Este esquema se ilustra en la Figura 6-10.

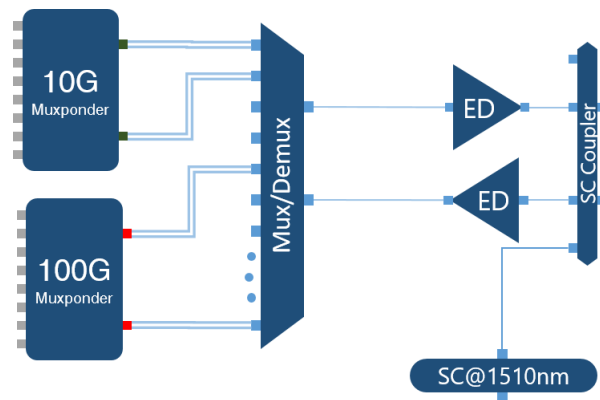


Figura 6-7. Nodo de agregación estático simple basado en Multiplexores.

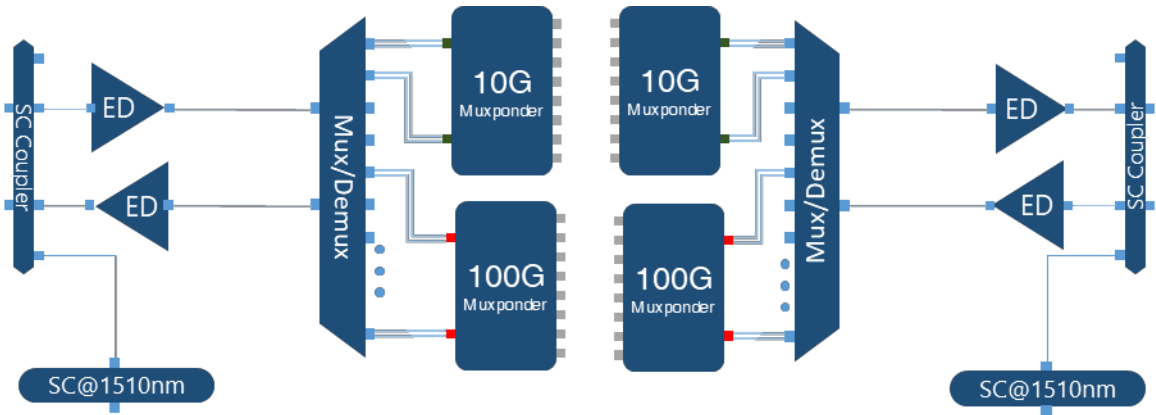


Figura 6-8. Nodo de agregación estático de dos grados basado en Multiplexores.

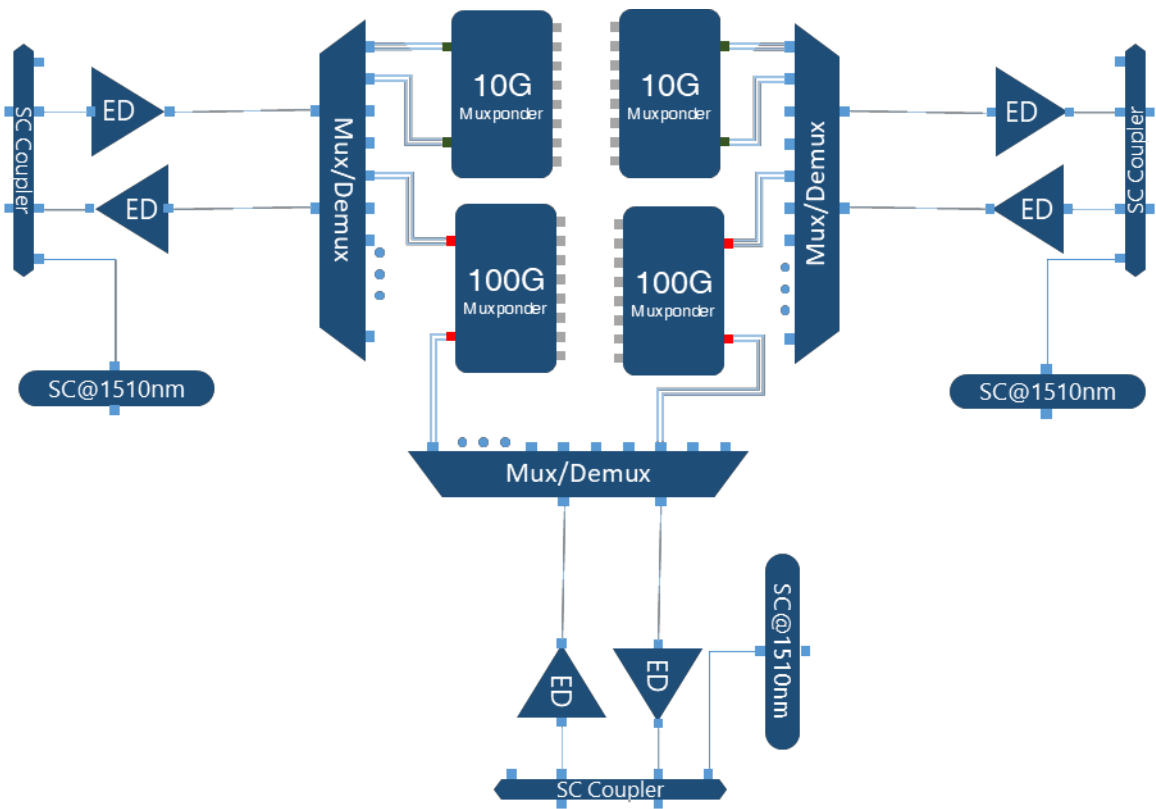


Figura 6-9. Nodo de agregación estático de tres grados basado en Multiplexores.

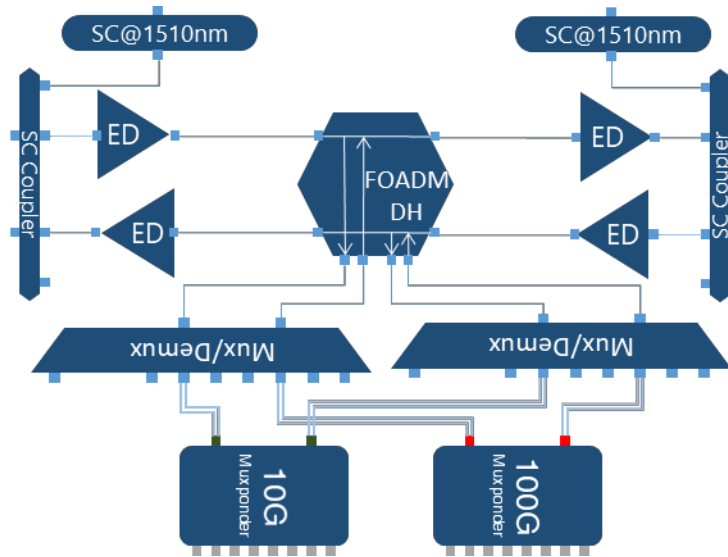


Figura 6-10. Nodo de agregación estático de dos grados basado en OADM.

6.1.3. Nodo Agregación Dinámico:

Los nodos dinámicos de agregación permiten agregar, desagregar, direccionar o proteger cualquier longitud de onda desde cualquier origen y hacia cualquier destino. Este tipo de nodos se conoce como ROADM y su elemento base es el WSS (ver sección 3.1.6). Existen dos arquitecturas de WSS como se muestra en la Figura 6-11.

La arquitectura *Broadcast and Select* cuenta con un acoplador 1xN en la entrada y un WSS en la salida. El acoplador de entrada divide la señal DWDM hacia las tarjetas WSS de los demás sentidos para realizar el enrutamiento de la señal y hacia el Demultiplexor para realizar la desagregación de tráfico, mientras que el WSS en la salida recibe las señales provenientes del Multiplexor (agregación de tráfico) y las señales provenientes de las demás placas WSS correspondientes a los demás sentidos, permitiendo la salida de una longitud de onda solo desde el origen seleccionado y bloqueando el resto de señales.

Este tipo de WSS es el más usado actualmente, a pesar de ello, cuando se tienen nodos de muchos grados (entiéndase el número de grados como la cantidad de pares de fibra óptica que llegan a un nodo ROADM), al tener un acoplador en transmisión, el elemento de selección recibe muchas señales de diversos destinos en diversas longitudes de onda, lo cual puede causar penalidades de OSNR por *crosstalk* [38].

La arquitectura *Route and Select*, reemplaza el acoplador por un WSS en el sentido de transmisión, el cual solo envía la longitud de onda seleccionada en el destino seleccionado, disminuyendo de esa forma la cantidad de señales que llegan al WSS ubicado en la salida del dispositivo y minimizando la penalidad por *crosstalk*. Este tipo de soluciones tiene un costo mayor que la solución *Broadcast and Select* pero presenta un mejor desempeño cuando se tiene un número mayor de grados, adicionalmente, este tipo de soluciones es más adecuado para arquitecturas ROADM CDC (*Colorless, Directionless, Contentionless*).

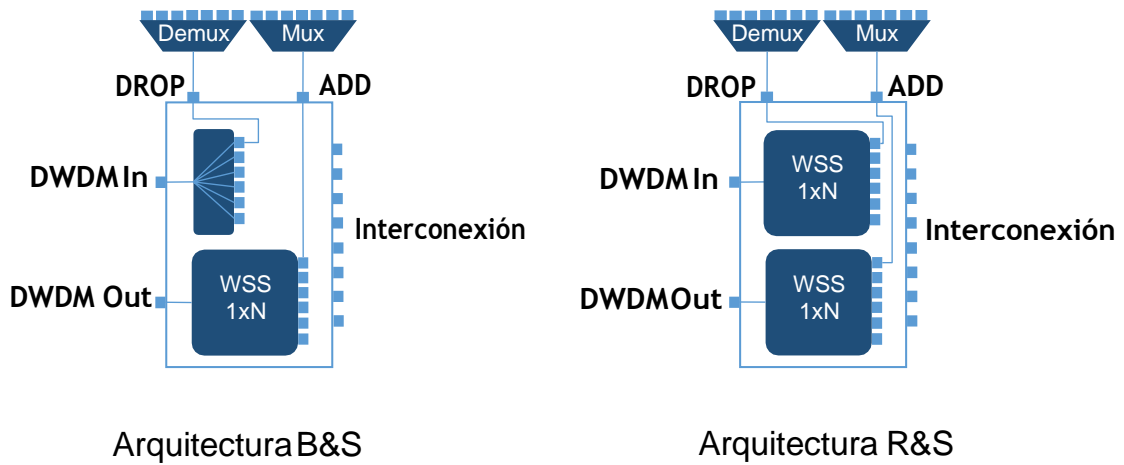


Figura 6-11. Arquitecturas WSS Broadcast and Select y Route and Select.

Los WSS tienen altas pérdidas de inserción, por lo tanto se deben agregar amplificadores ópticos para mitigar estas pérdidas. Al conjunto de WSS, amplificadores, Multiplexores, Demultiplexores y acopladores de canal de servicio que permiten la integración de los WSS con otro tipo de nodos como amplificadores, OADM y terminales, se conoce como ROADM. En la Figura 6-12 se detalla los componentes de un nodo ROADM grado 2 basado en WSS Broadcast and Select, mientras que en la Figura 6-13 se detalla un nodo grado 4.

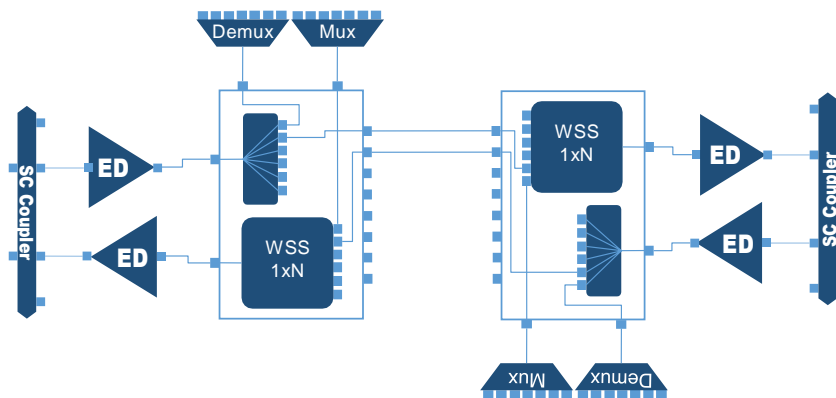


Figura 6-12. ROADM grado 2 basado en WSS Broadcast and Select.

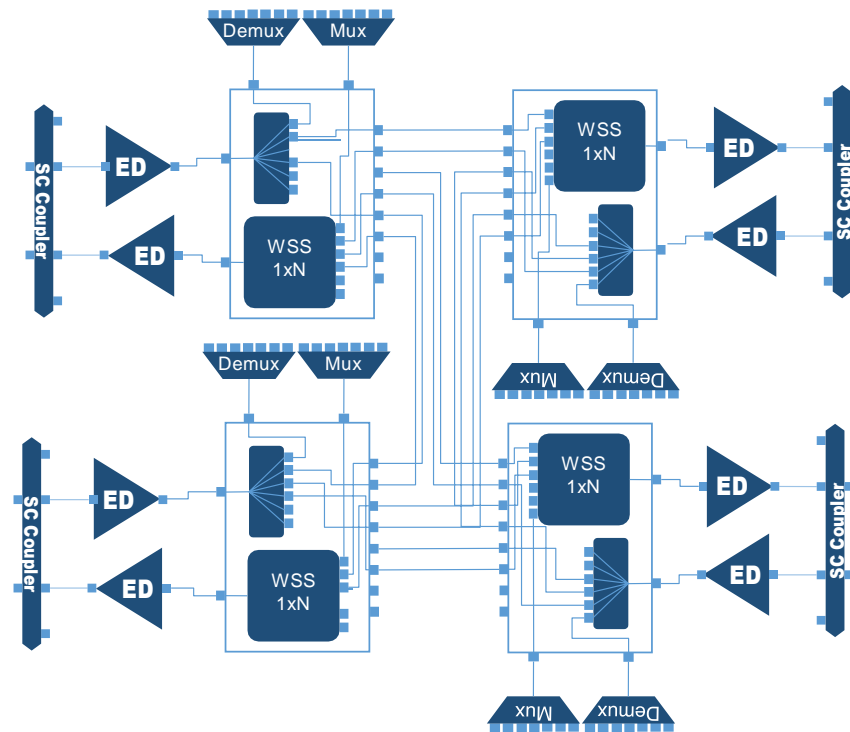


Figura 6-13. ROADM grado 4 basado en WSS Route and Select.

6.2. Análisis Capex

Al realizar la revisión bibliográfica de los análisis de Capex, se encontraron diversos enfoques, a continuación se citan los más relevantes:

En la referencia [69], los autores definen el Capex como la suma de los costos asociados a infraestructura (C_{inf}) más los costos asociados a instalación (C_{inst}) y los costos de la infraestructura no asociada a telecomunicaciones (C_{otn}). De esta forma se define el Capex como:

$$C_{capex}(n) = C_{inf}(n) + C_{inst}(n) + C_{otn}(n) \quad (6-1)$$

En la referencia [68], se separa el Capex en costos asociados a la transmisión de la señal (TRANS) y costos asociados al manejo del ancho de banda de la señal (BWM), definiéndolo como:

$$C_{capex} = \sum_{n \in \text{TRANS}} C_{trans}(n) + \sum_{n \in \text{BWM}} C_{bwm}(n) \quad (6-2)$$

Donde C_{capex} es el Capex, n es el número de nodos de tipo n y C_{n} es el costo de un NE tipo n . Dentro de los costos asociados a transmisión (TRANS) se incluyen los elementos de capa

óptica como amplificadores, multiplexores y transponders, mientras que en los costos asociados a manejo de ancho de banda (BWM) se agregan los enrutadores eléctricos y ópticos (OADM, WSS, OXC).

Con el fin de simplificar el análisis, la estrategia para análisis de Capex usada será la explicada en la referencia [70]. Independiente de la tecnología o arquitectura considerada, una red se compone de sitios físicos donde se almacenan equipos y componentes, llamado nodo, cuyo costo se define como C_n y conexiones físicas llamadas enlaces, las cuales se usan para interconectar los diferentes nodos por medio de interfaces compatibles y formar la topología de red y cuyo costo se define como C_l [70]

Por esta razón, como la red está compuesta de enlaces y nodos, el Capex se puede representar como la suma de los costos asociados a los nodos y la suma de los costos asociados a los enlaces:

$$C_{\text{Capex}} = C_n + C_l \quad (6-3)$$

6.3. Modelo de Costos

Hasta el momento, basado en la revisión de las bases de datos bibliográficas disponibles, se han presentado modelos de costos para redes IP transportadas sobre SDH y WDM [71], y modelos basados en la tecnología WDM [72]. Los análisis más detallados sobre modelos de costos para redes de transporte, presentados en [73] y [74], han creado alianzas entre proveedores y operadores alrededor del mundo para generar un modelo genérico de red y un conjunto de precios de referencia sin referenciar ningún producto de algún proveedor específico.

En la referencia [73], el modelo es desarrollado por el proyecto STRONGEST (*scalable, tunable and resilient optical networks guaranteeing extremely-high speed transport*) y desarrolla un modelo de Capex para las tecnologías IP/MPLS, MPLS-TP, WDM y OTN, mientras que el modelo presentado en [74] es desarrollado por un consorcio del proyecto integrado IST (*Information Society Technology*) y el proyecto NOBEL (*Next Generation Optical Networks for Broadband European Leadership*). Análisis posteriores de Capex y Opex de trabajos más recientes toman en cuenta los modelos [73] y [74] para analizar nuevas tecnologías o arquitecturas.

La referencia [75] presenta análisis de costos para las diferentes estrategias de amplificación óptica basada en tecnologías EDFA y RAMAN, la referencia [76] analiza las arquitecturas de switches OTN, mientras que en [77] se analiza el impacto en el costo de los elementos ópticos para soportar esquemas *flexgrid* y en [78] se analiza el costo incremental de los transponders de ancho de banda variable y su impacto en el Capex del sistema.

En los trabajos presentados anteriormente, se toma como costo normalizado de referencia el valor de un transponder 10G para un alcance de 750km. En mi criterio personal, este criterio no es del todo conveniente, ya que la distancia máxima soportada sin regeneración dependerá de la relación señal a ruido óptica (OSNR), la cual a su vez depende de los parámetros físicos de la red como tipo de fibra, factor de atenuación, margen de seguridad, margen de operación y las características de la red como tasa de bit, figura de ruido de los

amplificadores y pérdidas de inserción de los elementos ópticos como Multiplexores o WSS. Uno de los aportes de este trabajo consiste en que la cantidad de transponders, amplificadores y elementos de red se calcula basado en análisis reales de OSNR y dispersión cromática y restricciones de arquitecturas reales a nivel de latencia. En la Tabla 6-1 se presentan los costos de referencia para los elementos de la capa óptica.

Tabla 6-1. Modelo De Costos Elementos Capa Óptica

<u>Elemento</u>	<u>Característica</u>	<u>Costo Normalizado</u>
Transponder 10G LH	OSNR=15db OOK	1
Transponder 10G ULH	OSNR=12db OOK	1.5
Transponder 100G LH	OSNR=15db DP-QPSK	6
Transponder 100G ULH	OSNR=12db DP-QPSK	8
Transponder 200G LH	OSNR=17db DP-8QAM	7
EDFA Simple		0.7
EDFA Dual		1
Hibrido EDFA/RAMAN		1.4
DCFM		1
SC Coupler		0.1
Mux/Demux 8ch		0.3
Mux/Demux 20ch		0.8
Mux/Demux 40ch		1
Mux/Demux 80ch		1.5
OADM 2Ch		0.8
OADM 4Ch		1
OADM 8Ch		1.2
OCM		1
WSS 5G		2
WSS 9G		3

Conociendo los costos unitarios es posible deducir el costo de cada tipo de nodo de acuerdo a la información de la Tabla 6-1 y las topologías presentadas en la sección 6.1. El resumen del costo de los diferentes tipos de nodos se presenta en la Tabla 6-2. Los tipos de nodos presentados solo tienen en cuenta la infraestructura de la capa óptica, sin tener en cuenta los transponders necesarios. La cantidad de transponders se debe calcular de acuerdo a la

matriz de tráfico inicial y a la expectativa de crecimiento siguiendo los costos presentados en la Tabla 6-1 y considerando dos transponders por cada enlace.

Tabla 6-2. Modelo De Costos Tipos de Nodos

<u>Tipo de Nodo</u>	<u>Elementos que lo componen</u>	<u>Costo Normalizado</u>
Amplificador Tipo A	1xEDFA Dual + SC Coupler	1.1
Amplificador Tipo B	1xEDFA Simple + 1xEDFA Dual + DCFM + SC Coupler	2.8
Amplificador Tipo C	1xEDFA Simple + 1xHibrido EDFA/RAMAN + SC Coupler	2.2
Amplificador Tipo D	1xEDFA Dual + 1xHibrido EDFA/RAMAN + DCFM + SC Coupler	3.5
Amplificador Tipo E	2xHibrido EDFA/RAMAN + SC Coupler	2.9
Amplificador Tipo F	1xEDFA Simple + 2xHibrido EDFA/RAMAN + DCFM + SC Coupler	4.6
Nodo de agregación estático simple basado en Multiplexores (40 Canales)	1x Mux/Demux 40ch	1
Nodo de agregación estático de dos grados basado en Multiplexores (40 Canales)	2x Mux/Demux 40ch	2
Nodo de agregación estático de tres grados basado en Multiplexores (40 Canales)	3x Mux/Demux 40ch	3
Nodo de agregación estático de dos grados basado en OADM (8 Canales)	1x OADM 8Ch	1.2
Nodo de agregación dinámico de un grado basado en WSS (40 Canales)	1x WSS 9G + 1xOCM + 1x Mux/Demux 40ch	5
Nodo de agregación dinámico de dos grado basado en WSS (40 Canales)	2x WSS 9G + 1xOCM + 2x Mux/Demux 40ch	13
Nodo de agregación dinámico de tres grado basado en WSS (40 Canales)	3x WSS 9G + 2xOCM + 3x Mux/Demux 40ch	20

6.4. Análisis Opex

Al realizar la revisión bibliográfica de los análisis de Opex, se encontraron diversos enfoques, a continuación se citan los más relevantes:

En la referencia [69], los autores definen el Opex como la suma de los costos continuos de infraestructura (C_{inf}) más los costos específicos no asociados a telecomunicaciones (C_{espec}) y los costos de procesos operaciones (C_{op}). Los C_{inf} se presentan como los costos presentes en la red cuando no se tienen fallas y se dividen en costos de consumo de energía (C_{en}), costo de arriendo de espacio para ubicar los equipos, conocido como *Collocation* (C_{col}) y el costo de arrendar infraestructura, como por ejemplo hilos de fibra óptica (C_{fib}). De esta forma se define el Opex como [69]:

$$Opex(t) = C_{inf}(t) + C_{espec}(t) + C_{op}(t) = C_{en}(t) + C_{col}(t) + C_{fib}(t) + C_{espec}(t) \quad (6-4)$$

6.5. Análisis de Integridad de la Red

Con el fin de determinar la integridad del diseño de ingeniería, es necesario entender los conceptos de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad.

La confiabilidad se entiende como la probabilidad de llegar al éxito, cuyo enfoque depende de datos disponibles de éxitos y fallas o en observaciones de desempeño en campo bajo condiciones reales o simuladas. Como los entornos varían, los datos de disponibilidad pueden ser diferentes de una medida a otra, por lo tanto, existe una medida de precisión asociada a la estimación de la confiabilidad, llamada nivel de confianza [79]. Los análisis de confiabilidad son normalmente realizados para sistemas no reparables, como los sistemas de comunicación satelital, o sistemas de reparación completa, como es el caso de los sistemas submarinos y no tiene en cuenta si el sistema es reparado o si el servicio es restaurado después de una falla, mientras que los análisis de disponibilidad y mantenibilidad son realizados para sistemas reparables. Ambas variables son distribuciones de probabilidad con valores entre cero y uno. La diferencia entre los dos es que la disponibilidad es una medida de la eficacia del desempeño total, usualmente del sistema, mientras que la mantenibilidad es la medida de la eficacia del desempeño durante el periodo de restauración, usualmente del equipo [79].

Para detallar la función de confiabilidad de una manera analítica, se deben conocer los conceptos de variable de estado y de tiempo de falla (TTF). La variable de estado se define como el estado operacional de un ítem en el tiempo t , y puede tomar los siguientes valores [80]:

$$S(t) = \begin{cases} 1, & \text{si el ítem está en estado operacional} \\ 0, & \text{si el ítem está en estado de falla} \end{cases} \quad (6-5)$$

La función discreta TTF se define como la cantidad de tiempo que pasa antes de que un elemento o sistema falle. Esta función puede ser extendida a un modelo estadístico. Delimitando el tiempo de falla como una variable aleatoria T , es posible detallar la probabilidad de que el tiempo de falla T sea mayor que $t = 0$ y menor que un tiempo t (También conocido como la función de probabilidad acumulada) como [80]:

$$F(t) = \int_0^t f(x) dx \quad [0, \infty) \quad (6-6)$$

Donde la función de probabilidad acumulada puede ser derivada de la función de densidad de probabilidad (PDF) evaluando la relación [80]:

$$F(t) = \int_0^t f(x) dx \quad [0, \infty) \quad (6-7)$$

Donde $f(t)$ es la PDF del tiempo de falla.

La función de confiabilidad es la probabilidad de que un ítem no falla en el intervalo $[0, t)$, por lo tanto se puede representar con la siguiente relación. La Figura 6-14 muestra la relación entre la CDF y la función de confiabilidad [80].

$$R(t) = 1 - F(t) \quad [0, \infty) \quad (6-8)$$

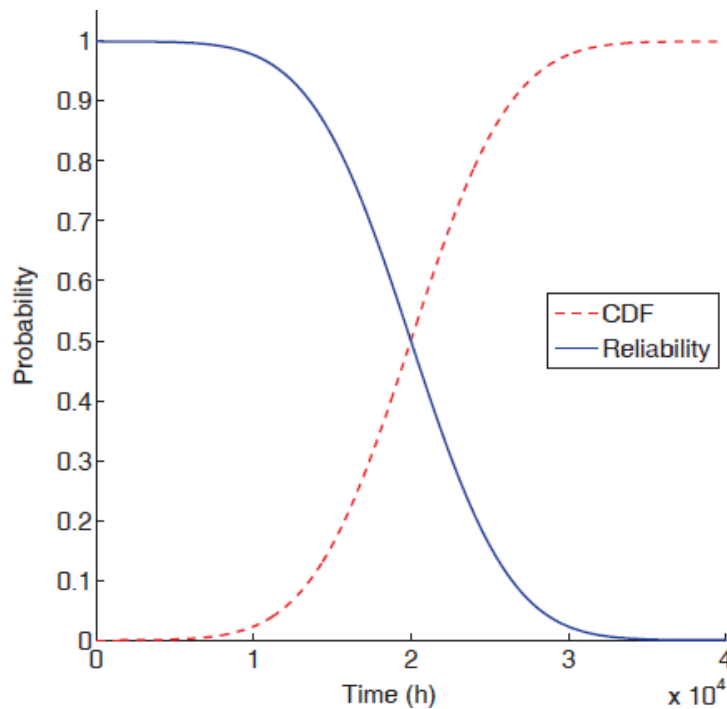


Figura 6-14. Función de densidad acumulada gaussiana y la función de confiabilidad asociada. Tomada de [80].

La medida de disponibilidad es normalmente usada en contratos para concretar los acuerdos de nivel de servicio entre la empresa prestadora de servicios y el cliente final. Si se tiene un ciclo de vida fijo para un equipo o sistema, la disponibilidad promedio se puede definir como [80]:

$$D = \frac{\int_0^T f(t) dt}{\int_0^T f(t) dt + \int_0^T r(t) dt} \quad (6-9)$$

Esta medida provee una disponibilidad media en un tiempo de operación determinado, en cambio, no es una medida confiable ya que se está tomando el tiempo de operación como el ciclo de vida del elemento. Para una medida más acertada de la disponibilidad del

sistema, es necesario especificar la duración y frecuencia de la falla. La disponibilidad puede ser definida por una función que depende del tiempo de la siguiente forma [80]:

$$D(t) = \frac{1}{\lambda + \mu} (\lambda e^{-\lambda t} + \mu e^{-\mu t}) \quad t \geq 0 \quad (6-10)$$

Donde se evidencia que la disponibilidad varía con el tiempo, lo cual se evidencia en un sistema real. La relación entre disponibilidad instantánea y disponibilidad es:

$$D_{avg} = \frac{1}{\lambda + \mu} \int_0^{\infty} D(t) (\lambda e^{-\lambda t} + \mu e^{-\mu t}) dt = \frac{\lambda + \mu}{\lambda + \mu + \lambda \mu} \quad (6-11)$$

Por otro lado, la indisponibilidad es la probabilidad de que el sistema esté en falla, por lo tanto se puede escribir como:

$$I(t) = 1 - D(t) \quad t \geq 0 \quad (6-12)$$

Y la relación entre indisponibilidad instantánea y promedio, es [80]:

$$I_{avg} = 1 - D_{avg} = \frac{\lambda \mu}{\lambda + \mu + \lambda \mu} \quad (6-13)$$

El operador debe calcular la cantidad y la ubicación de los repuestos, equipos redundantes o de backup en su red basado en el MTBF de los componentes del sistema, del tiempo medio de reparación que pueda brindar con su estructura de operación y mantenimiento y del nivel de disponibilidad que desee ofrecer en sus acuerdos de nivel de servicio con sus clientes finales.

Resumen

Este capítulo presenta las posibles configuraciones de nodos para la capa óptica de una red de transporte, desagregando cada configuración en sus componentes básicos, luego define un modelo de costos tomando como referencia el costo de un transponder 10G y define el modelo de Opex a utilizar.

7. Caso de Estudio

Para el caso de estudio se toma como base la red de transporte de la Red Nacional Académica de Tecnología Avanzada (RENATA) presentada en la Figura 7-1, de la cual solo se toman las ubicaciones de los sitios como referencia, pues no se encuentra disponible por lo menos en la web, su capacidad entre nodos. Para la distancia entre sitios se usa google maps.



Figura 7-1. Red de Transporte RENATA. Tomada de [81]

De acuerdo con la sección 1.3.2, se considera como escenario inicial una red de transporte basada en nodos de agregación estáticos y donde la protección de servicios se realice en una capa superior y compensada. Las características consideradas son las siguientes:

- Red DWDM de 40 canales con separación de 100GHz siguiendo la recomendación ITU-T G.694.1
- Fibra estándar G.652d
- Red compensada, con tasa de transmisión máxima de 10Gb/s por canal
- Agregación de tráfico basada en Multiplexores y OADM
- Interfaces de desagregación a 10Gb/s y 1.25Gb/s

Con respecto a la matriz de tráfico, como se busca analizar la migración de redes compensadas a redes coherentes, se considera para el análisis de la capa óptica un canal de 100Gb/s entre cada nodo principal de la red, adicionalmente se consideran canales a 100Gb/s entre las ciudades de llegada de cables submarinos (ver Figura 7-2) y las ciudades principales (Medellín y Bogotá), donde normalmente se encuentran los *data centers* principales en el país.

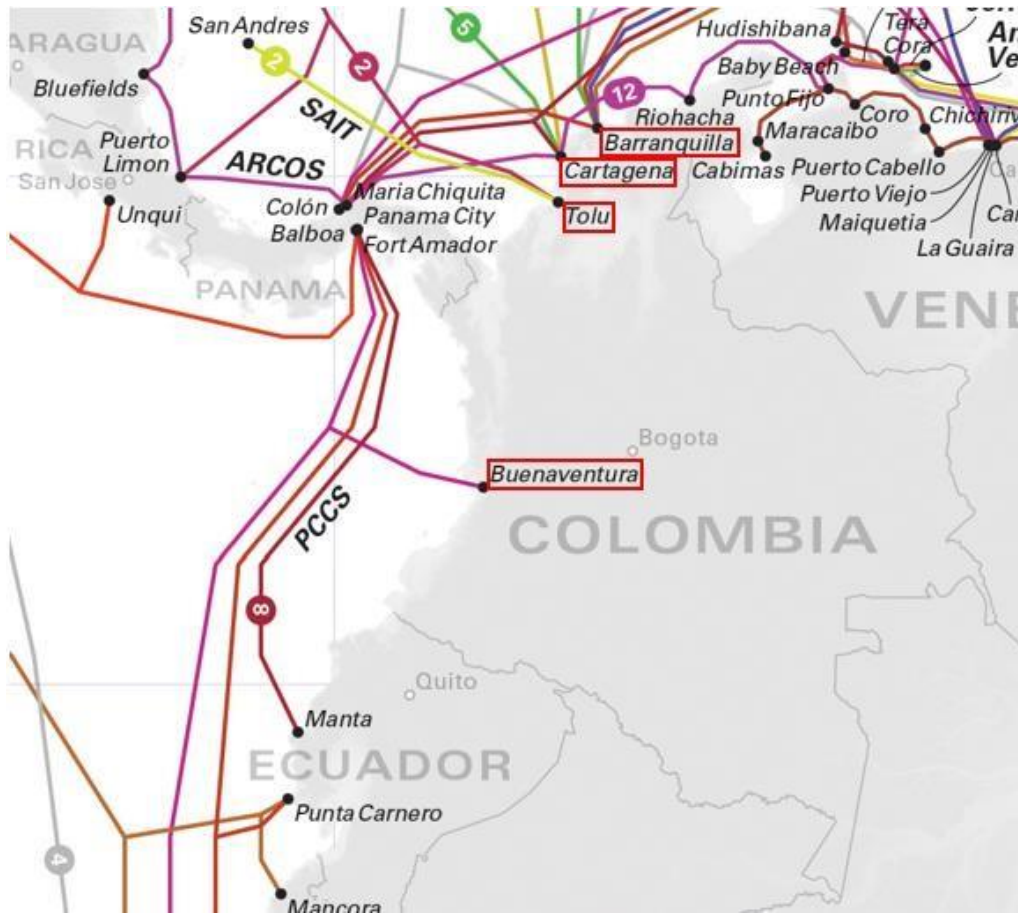


Figura 7-2. Mapa de cables submarinos en Colombia en 2018. Tomada de [81]

Las distancias usadas en el diseño se presentan en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1. Distancias consideradas en el caso de estudio

<u>Nodo 1</u>	<u>Nodo 2</u>	<u>Distancia (km)</u>
Barranquilla	Santa Marta	105
Santa Marta	Fundación	96,8
Fundación	Bosconia	70,9
Bosconia	Curumaní	100
Curumaní	Aguachica	114
Aguachica	San Alberto	69,9
San Alberto	Bucaramanga	99,4
Bucaramanga	San Gil	99,5
San Gil	Barbosa	115
Barbosa	Tunja	70,3
Tunja	Chocontá	68,4
Chocontá	Bogota	77,9
Bogota	Fusa	77,1

Fusa	Girardot	70,6
Girardot	Ibagué	68,1
Ibagué	Armenia	84,4
Barranquilla	Cartagena	134
Cartagena	Tolú	167
Tolú	Sincelejo	40,4
Sincelejo	Montería	116
Montería	Caucasia	122
Caucasia	Taraza	61,9
Taraza	Yarumal	98,9
Yarumal	Medellin	116
Medellin	La Pintada	77,7
La Pintada	Manizales	118
Manizales	Pereira	50,9
Pereira	Cartago	29,8
Cartago	Roldanillo	54,8
Roldanillo	Tuluá	49,5
Tuluá	Cali	92,1
Cali	Popayán	138
Popayán	El Bordo	81,2
El Bordo	Pasto	165
Pasto	Ipiales	82,9
Girardot	Espinal	20,6
Espinal	Natagaima	67,7
Natagaima	Neiva	90
Bogota	Villavicencio	123
Bucaramanga	Pamplona	119
Pamplona	Cúcuta	136
Bosconia	Valledupar	95,8

En la Figura 7-3 se presenta la matriz de tráfico considerada para el análisis técnico, el cual aplica para los dos escenarios de migración. Los escenarios finales de red se presentan en la sección 1.3.2.

El análisis técnico se basa en calcular la relación señal a ruido óptica de cada uno de los enlaces de interés, así como la latencia estimada y la dispersión cromática acumulada del enlace. Los resultados teóricos para cada uno de los enlaces detallados en la matriz de tráfico se muestran en el Anexo 1. En la Figura 7-4 se muestra los resultados teóricos para el enlace de referencia Bogotá – Barranquilla, el cual fue seleccionado debido a que es el enlace que une el punto principal de llegada de cables submarinos en Colombia con la ciudad de mayor cantidad de población acumulada y donde se encuentran los principales *data centers* del país.

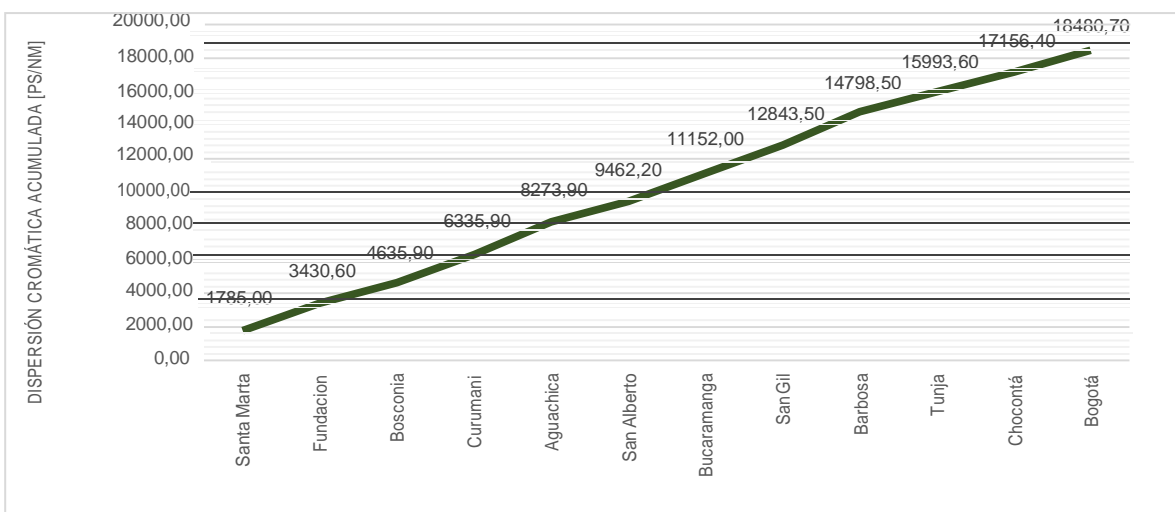
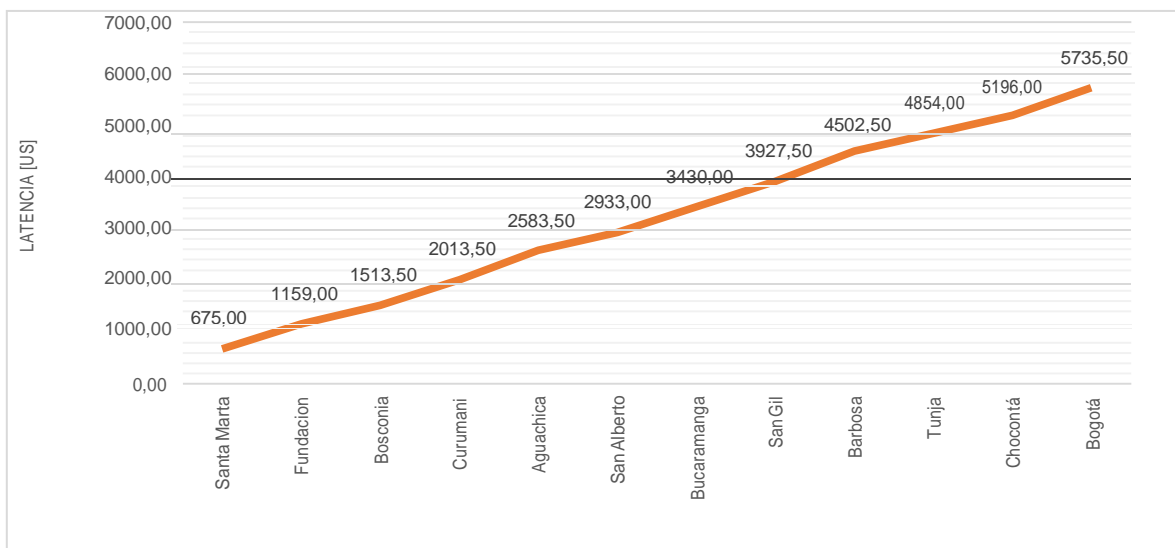
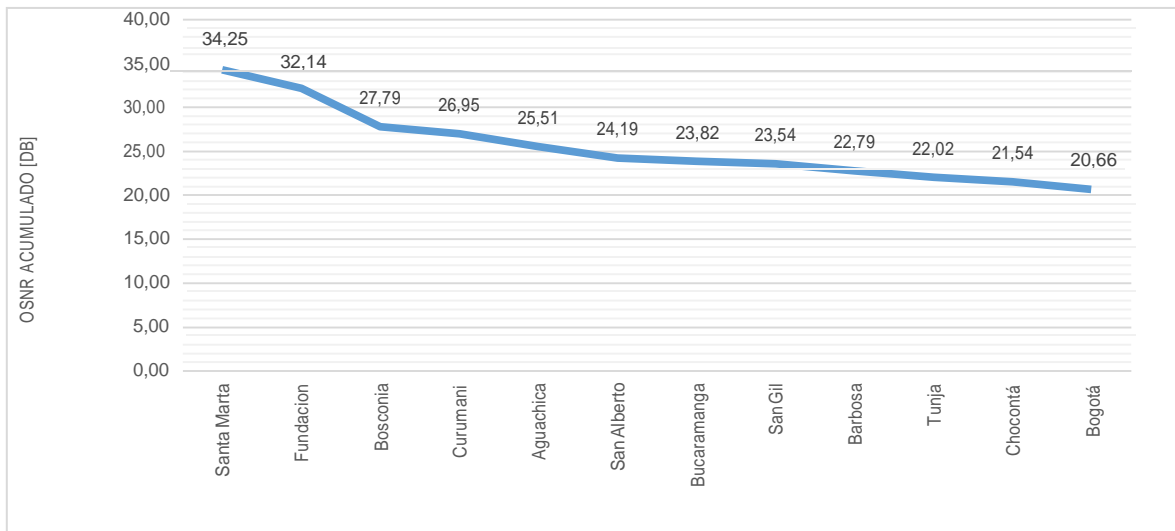


Figura 7-4. Análisis de OSNR, Latencia y Dispersión para el enlace Barranquilla – Bogotá

En la Tabla 7-2 se presenta el resumen del análisis técnico realizado.

Esta información es comparada con los requerimientos de relación señal a ruido dados por la OIF [53] y resumidos en la Tabla 5-1 con el fin de determinar si es posible implementar canales con tasas de bit superiores a 100Gb/s en la red de estudio. El análisis es presentado en la Figura 7-5 con respecto a relación señal a ruido y en la Figura 7-6 con respecto a dispersión cromática.

Tabla 7-2. Resumen Análisis Técnico

<u>Tramo</u>	<u>OSNR</u>	<u>Latencia</u>	<u>Dispersión</u>	<u>Distancia</u>
	<u>Acumulado [dB]</u>	<u>[us]</u>	<u>Acumulada [ps/nm]</u>	<u>Total [km]</u>
Santa Marta - Valledupar	28,05150372	1617,5	4479,5	263,5
Valledupar - Bucaramanga	25,6743491	2695,5	8144,7	479,1
Bucaramanga - Tunja	26,71079095	1724	4841,6	284,8
Tunja - Bogotá	26,38228362	1031,5	2487,1	146,3
Bogotá - Ibagué	25,04885747	1379	3668,6	215,8
Ibagué - Armenia	39,4	722	1434,8	84,4
Santa Marta - Barranquilla	34,25	825	1785	105
Barranquilla - Cartagena	31	970	2278	134
Cartagena - Sincelejo	22,60363226	1337	3525,8	207,4
Sincelejo - Montería	31,5	880	1972	116
Montería - Medellín	25,44906917	2294	6779,6	398,8
Medellín - Manizales	26,50261959	1278,5	3326,9	195,7
Manizales - Pereira	35,775	554,5	865,3	50,9
Pereira - Cali	29,88085798	1431	3845,4	226,2
Cali - Popayán	30	990	2346	138
Popayán - Pasto	21,26668777	1531	4185,4	246,2
Barranquilla - Sincelejo	21,15786114	2007	5803,8	341,4
Barranquilla - Medellín	19,33243973	4581	14555,4	856,2
Barranquilla - Cali	18,06861788	6945	22593	1329
Barranquilla - Bogotá	20,66386597	5735,5	18480,7	1087,1

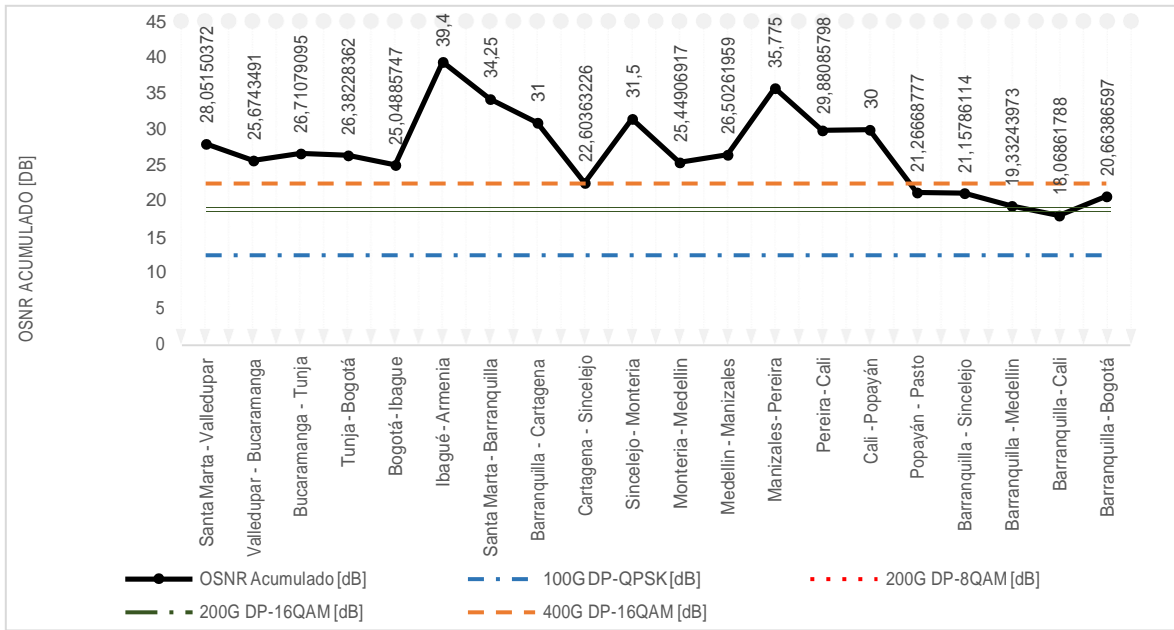


Figura 7-5. Posibilidades de crecimiento basadas en el OSNR del tramo

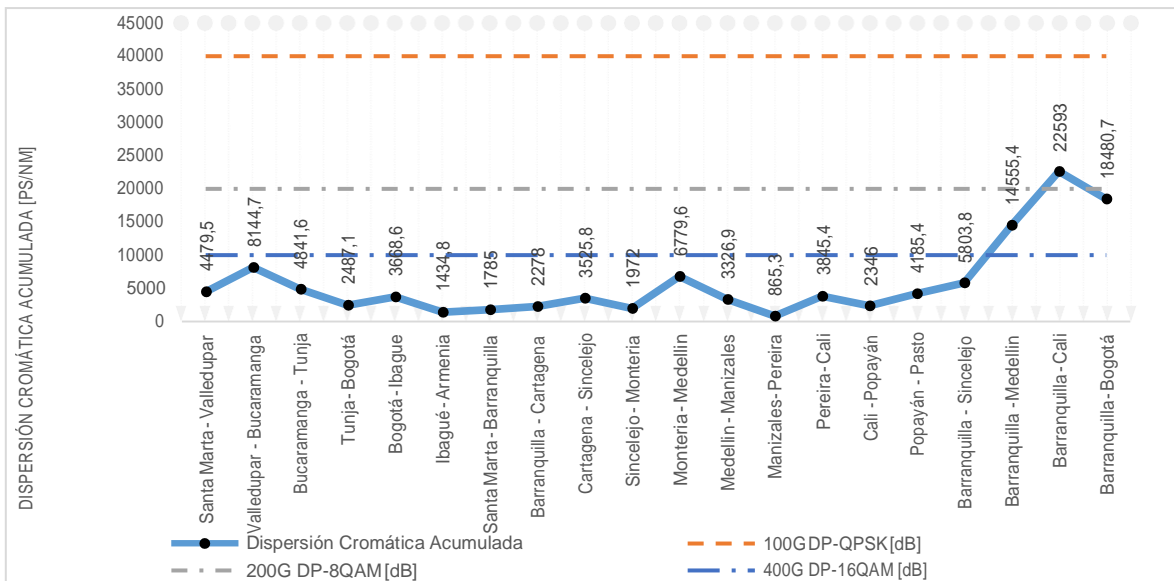


Figura 7-6. Posibilidades de crecimiento basadas en la dispersión cromática del tramo

Escenario Final 1: Migración de redes estáticas a redes dinámicas, permitiendo diferentes escenarios de restauración en capa óptica basada en arquitecturas ROADM Directionless

Al evaluar la migración de una red estática a una red dinámica, solo se deben evaluar los componentes adicionales que permiten direccionar, agregar y desagregar canales de manera dinámica. Comparando los componentes de la Figura 6-7 con los presentados en la Figura 6-12, es posible deducir que los elementos que deben ser agregados al sistema son los WSS y las tarjetas OCM, ya que los multiplexores y amplificadores ópticos se mantienen en la estructura del sistema DWDM.

Con el fin de implementar una solución *Directionless*, es necesario agregar una placa WSS adicional junto con un multiplexor óptico y un amplificador EDFA dual para compensar las pérdidas de inserción adicionales.

La Tabla 7-3 presenta el listado de partes adicionales y el costo asociado de acuerdo al número de grados del nodo. Los precios de referencia para los elementos se toman de la Tabla 6-1.

Tabla 7-3. Costo asociado a la migración hacia el escenario 1.

<u>Listado de Nodos</u>	<u>Tipo de Nodo Escenario Inicial</u>	<u>Tipo de Nodo Escenario 2</u>	<u>Grados</u>	<u>Diferencia</u>	<u>Costo</u>
Barranquilla	Agregación Estático	Agregación Dinámico	2	3xWSS + 1xOCM + 1xMUX/DEMUX + 1xEDFA Dual	12
Santa Marta	Agregación Estático	Agregación Dinámico	2	3xWSS + 1xOCM + 1xMUX/DEMUX + 1xEDFA Dual	12
Bosconia	Agregación Estático	Agregación Dinámico	3	4xWSS + 1xOCM + 1xMUX/DEMUX + 1xEDFA Dual	15
Bucaramanga	Agregación Estático	Agregación Dinámico	3	4xWSS + 1xOCM + 1xMUX/DEMUX + 1xEDFA Dual	15
Tunja	Agregación Estático	Agregación Dinámico	2	3xWSS + 1xOCM + 1xMUX/DEMUX + 1xEDFA Dual	12
Bogota	Agregación Estático	Agregación Dinámico	3	4xWSS + 1xOCM + 1xMUX/DEMUX + 1xEDFA Dual	15
Espinal	Agregación Estático	Agregación Dinámico	3	4xWSS + 1xOCM + 1xMUX/DEMUX + 1xEDFA Dual	15
Ibague	Agregación Estático	Agregación Dinámico	2	3xWSS + 1xOCM + 1xMUX/DEMUX + 1xEDFA Dual	12
Armenia	Agregación Estático	Agregación Dinámico	2	3xWSS + 1xOCM + 1xMUX/DEMUX + 1xEDFA Dual	12
Cartagena	Agregación Estático	Agregación Dinámico	2	3xWSS + 1xOCM + 1xMUX/DEMUX + 1xEDFA Dual	12
Sincelejo	Agregación Estático	Agregación Dinámico	2	3xWSS + 1xOCM + 1xMUX/DEMUX + 1xEDFA Dual	12
Monteria	Agregación Estático	Agregación Dinámico	2	3xWSS + 1xOCM + 1xMUX/DEMUX + 1xEDFA Dual	12
Medellin	Agregación Estático	Agregación Dinámico	2	3xWSS + 1xOCM + 1xMUX/DEMUX + 1xEDFA Dual	12

Manizales	Agregación Estático	Agregación Dinámico	2	3xWSS + 1xOCM + 1xMUX/DEMUX + 1xEDFA Dual	12
Pereira	Agregación Estático	Agregación Dinámico	3	4xWSS + 1xOCM + 1xMUX/DEMUX + 1xEDFA Dual	15
Cali	Agregación Estático	Agregación Dinámico	2	3xWSS + 1xOCM + 1xMUX/DEMUX + 1xEDFA Dual	12
Popayán	Agregación Estático	Agregación Dinámico	2	3xWSS + 1xOCM + 1xMUX/DEMUX + 1xEDFA Dual	12
Pasto	Agregación Estático	Agregación Dinámico	2	3xWSS + 1xOCM + 1xMUX/DEMUX + 1xEDFA Dual	12
Ipiales	Agregación Estático	Agregación Dinámico	1	1xWSS + 1xOCM	7
Neiva	Agregación Estático	Agregación Dinámico	1	1xWSS + 1xOCM	7
Villavicencio	Agregación Estático	Agregación Dinámico	1	1xWSS + 1xOCM	7
Cúcuta	Agregación Estático	Agregación Dinámico	1	1xWSS + 1xOCM	7
Valledupar	Agregación Estático	Agregación Dinámico	1	1xWSS + 1xOCM	7
Total					266

Escenario Final 2: Migración de redes compensadas a redes coherentes o redes híbridas con compensadores de dispersión basados en rejillas de *Bragg*.

El hecho de migrar una red compensada a una red coherente implica un cambio significativo en la capa óptica de la red, ya que los canales de 10Gb/s pueden ser disparados con una potencia mayor que los canales a 100Gb/s dado que éstos son más susceptibles a efectos no lineales, por lo tanto será necesario agregar amplificación RAMAN en algunos tramos con el fin de bajar la potencia de transmisión de los canales al valor recomendado para transmisión a 100Gb/s.

En la Tabla 7-4 se listan los tipos de amplificadores usados para la red compensada y la red coherente respectivamente.

Tabla 7-4. Requerimientos de cambio de amplificadores en el escenario 2.

<u>Enlace</u>	<u>Distancia (km)</u>	<u>Amplificador Red Compensada</u>	<u>Amplificador Red Coherente</u>
Barranquilla - Santa Marta	105	Amplificador Tipo D	Amplificador Tipo C
Santa Marta - Fundación	96,8	Amplificador Tipo D	Amplificador Tipo C
Fundación - Bosconia	70,9	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo A

Bosconia - Curumaní	100	Amplificador Tipo D	Amplificador Tipo C
Curumaní - Aguachica	114	Amplificador Tipo D	Amplificador Tipo C
Aguachica - San Alberto	69,9	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo A
San Alberto - Bucaramanga	99,4	Amplificador Tipo D	Amplificador Tipo C
Bucaramanga - San Gil	99,5	Amplificador Tipo D	Amplificador Tipo C
San Gil - Barbosa	115	Amplificador Tipo D	Amplificador Tipo C
Barbosa - Tunja	70,3	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo A
Tunja - Chocontá	68,4	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo A
Chocontá - Bogota	77,9	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo A
Bogota - Fusa	77,1	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo A
Fusa - Girardot	70,6	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo A
Girardot - Ibagué	68,1	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo A
Ibagué - Armenia	84,4	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo C
Barranquilla - Cartagena	134	Amplificador Tipo D	Amplificador Tipo E
Cartagena - Tolú	167	Amplificador Tipo F	Amplificador Tipo E
Tolú - Sincelejo	40,4	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo A
Sincelejo - Montería	116	Amplificador Tipo D	Amplificador Tipo C
Montería - Caucasia	122	Amplificador Tipo D	Amplificador Tipo C
Caucasia - Taraza	61,9	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo A
Taraza - Yarumal	98,9	Amplificador Tipo D	Amplificador Tipo C
Yarumal - Medellín	116	Amplificador Tipo D	Amplificador Tipo C
Medellin - La Pintada	77,7	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo A
La Pintada - Manizales	118	Amplificador Tipo D	Amplificador Tipo C
Manizales - Pereira	50,9	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo A
Pereira - Cartago	29,8	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo A
Cartago - Roldanillo	54,8	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo A
Roldanillo - Tuluá	49,5	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo A
Tuluá - Cali	92,1	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo C

Cali - Popayán	138	Amplificador Tipo D	Amplificador Tipo E
Popayán - El Bordo	81,2	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo A
El Bordo - Pasto	165	Amplificador Tipo F	Amplificador Tipo E
Pasto - Ipiales	82,9	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo C
Girardot - Espinal	20,6	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo A
Espinal - Natagaima	67,7	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo A
Natagaima - Neiva	90	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo C
Bogota - Villavicencio	123	Amplificador Tipo D	Amplificador Tipo C
Bucaramanga - Pamplona	119	Amplificador Tipo D	Amplificador Tipo C
Pamplona – Cúcuta	136	Amplificador Tipo D	Amplificador Tipo E
Bosconia - Valledupar	95,8	Amplificador Tipo D	Amplificador Tipo C

Analizando los componentes de cada uno de los tipos de amplificadores, se encuentra que solo los enlaces de la Tabla 7-5 requieren agregar amplificadores Raman en transmisión o recepción con el fin de que la red soporte canales a 100Gb/s.

Tabla 7-5. Costo asociado a la migración hacia el escenario 2.

<u>Enlace</u>	<u>Tipo de amplificador para tasa de 10Gb/s</u>	<u>Tipo de amplificador para tasa de 100Gb/s</u>	<u>Diferencia</u>	<u>Costo</u>
Ibagué – Armenia	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo C	2xRAMAN Rx	2,8
Barranquilla - Cartagena	Amplificador Tipo D	Amplificador Tipo E	2xRAMAN Tx	2
Tuluá – Cali	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo C	2xRAMAN Rx	2,8
Cali – Popayán	Amplificador Tipo D	Amplificador Tipo E	2xRAMAN Tx	2
Pasto – Ipiales	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo C	2xRAMAN Rx	2,8
Natagaima – Neiva	Amplificador Tipo B	Amplificador Tipo C	2xRAMAN Rx	2,8
Pamplona – Cúcuta	Amplificador Tipo D	Amplificador Tipo E	2xRAMAN Tx	2
Total				17,2

En el Anexo 2 – Modelo de Capex, se adjunta la planilla de análisis técnico y económico donde se ingresa la topología, características de la red origen y destino, matriz de tráfico deseada y se obtienen los análisis de OSNR, latencia y dispersión cromática y los costos de migración correspondientes.

En la Tabla 7-6 se resume el análisis técnico indicando si el enlace soporta canales a 100G y 200G basados en los resultados de relación señal a ruido, dispersión cromática y PMD mostrados en el Anexo 1 del trabajo.

Tabla 7-6. Resultados capacidad máxima por canal por enlace

Enlace	100G @ DP-QPSK			200G @ DP-8QAM			200G @ DP-16QAM		
	CD	OSNR	PMD	CD	OSNR	PMD	CD	OSNR	PMD
Santa Marta - Valledupar	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Valledupar - Bucaramanga	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Bucaramanga - Tunja	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Tunja - Bogotá	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Bogotá - Ibagué	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Ibagué - Armenia	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Santa Marta - Barranquilla	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Barranquilla - Cartagena	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Cartagena - Sincelejo	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Sincelejo - Montería	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Montería - Medellín	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Medellín - Manizales	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Manizales - Pereira	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Pereira - Cali	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Cali - Popayán	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Popayán - Pasto	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Barranquilla - Sincelejo	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok
Barranquilla - Medellín	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	NO	Ok
Barranquilla - Cali	Ok	Ok	Ok	NO	NO	Ok	NO	NO	Ok
Barranquilla - Bogotá	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok

Recomendaciones

- Para superar la limitación de dispersión cromática en el enlace Barranquilla – Cali, es posible agregar un compensador de dispersión basado en rejillas de *Bragg* de por lo menos 600ps/nm con el fin de permitir la implementación de los canales a 200Gb/s. Este compensador de dispersión puede ser implementado en cualquiera de los tramos entre Manizales y Tuluá, donde no afectaría en gran medida el desempeño del sistema debido a que son tramos de corta distancia.
- Sobre la limitación de relación señal a ruido óptica del enlace Barranquilla – Cali y Barranquilla – Medellín, se recomienda implementar amplificadores Raman de potencia superior o implementar nodos intermedios en los tramos de larga distancia, como es el caso de Barranquilla – Cartagena, Cartagena – Tolú o Montería – Cauca. En el Anexo 1 se presenta el impacto en OSNR al implementar nodos intermedios.

- Como recomendación general, en caso de presentarse problemas de ONSR, se debe tratar de aumentar la potencia de entrada de los amplificadores EDFA, implementando esquemas de amplificación distribuida como Raman o implementando sitios intermedios para mantener el OSNR en niveles adecuados para implementar canales de tasa de bit superior.
- En el caso de tener problemas de dispersión cromática, es posible en algunos casos agregar pequeños compensadores en tramos cortos de la red para mitigar este problema, en caso de no tener compensadores, se debe regenerar la señal.
- Para el caso de limitaciones de PMD, no es muy común encontrar compensadores de este tipo de dispersión en el mercado, por lo tanto la recomendación sería regenerar la señal del transponder en algún sitio intermedio o usar tasas de bit y formatos de modulación que cumplan con el límite de PMD soportado por el receptor.

8. Conclusiones y Trabajo Futuro

En este capítulo se presentan las principales conclusiones y trabajo futuro.

Para preparar la red de transporte para soportar menores latencias y mayores anchos de banda, el punto más crítico es adaptar la capa de amplificadores para soportar la transmisión de canales a menor potencia y mantener los niveles de recepción adecuados para optimizar la relación señal a ruido. Al momento de tener la capa óptica preparada, es posible eliminar compensadores de dispersión basados en fibra e implementar canales a mayor tasa de bit sin mayores complicaciones técnicas.

Con respecto a la separación entre sitios amplificadores, los enlaces de fibra de más de 120km representan la mayor limitación para permitir que la red crezca a nivel de número de canales y de tasa de bit por canal. La planeación de la red de transporte debe diseñarse en lo posible con distancias ópticas menores a este valor.

La fibra G.652 se presenta como la mejor opción de medio de transmisión para tener una red escalable, ya que a pesar de tener una dispersión cromática mayor en la banda C (la cual es compensada por los transponders coherentes), presenta menor impacto en los efectos no lineales del sistema. Las fibras G.655 y G.653 tendrán limitaciones con respecto al número total de canales del sistema.

Como trabajo futuro, se propone continuar trabajando en el modelo de Capex y Opex presentado, incluyendo nuevos escenarios finales de migración, realizando análisis de disponibilidad para esquemas de restauración 1+1 y 1+1+R y agregando análisis para redes de capas superiores del modelo OSI.

REFERENCIAS

- [1] M. Jaeger and R. Huelsermann, "Network Migration Cost Study," in *Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, 2010, p. 6.
- [2] A. Mayoral, O. G. De Dios, V. Lopez, and J. P. Fernandez-palacios, "Migration Steps Towards Flexi - grid Networks," in *2013 Future Network & Mobile Summit*, 2013, no. 1, pp. 1–9.
- [3] A. Leiva, C. M. Machuca, A. Beghelli, and R. Olivares, "Migration Cost Analysis for Upgrading WDM Networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 11, pp. 87–93, 2013.
- [4] X. Yu *et al.*, "Migration from Fixed Grid to Flexible Grid in Optical Networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. February, pp. 34–43, 2015.
- [5] M. Ruiz, L. Velasco, U. P. De Catalunya, and R. Wessäly, "Planning Fixed to Flexgrid Gradual Migration: Drivers and Open Issues," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. January 2014, pp. 70–76, 2014.
- [6] O. Renais, E. Le Rouzic, and G. Yven, "Migrating to a next generation WDM core network," in *The 13th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium*, 2008, pp. 11–19.
- [7] A. L. Leiva, C. M. Machuca, and A. Z. Beghelli, "Upgrading cost modelling of capacity-exhausted static WDM networks," no. 3.
- [8] A. M. C. SOTO, S. SALES, J. CAPMANY, M. GARCIA, and M. G. MOLINA, "Optical access networks planning based on a new model of bandwidth growth estimation," *J. Light. Technol.*, 2004.
- [9] Stordahl, "Traffic forecast models for the transport network," *Networks 2002*, 2002.
- [10] T. Islam, D. Fiebig, and N. Meade, "Modelling multinational telecommunications demand with limited data," in *International Journal of Forecasting 18*, 2000, pp. 605–624.
- [11] OECD, "Broadband Statistics." [Online]. Available: <http://www.oecd.org/sti/broadband/broadband-statistics/>.
- [12] CEPAL, "Estimaciones y proyecciones de población total, urbana y rural, y económicamente activa." [Online]. Available: <https://www.cepal.org/es/temas/proyecciones-demograficas/estimaciones-proyecciones-poblacion-total-urbana-rural-economicamente-activa>.
- [13] MinTIC, "Boletín trimestral de las TIC," 2014. [Online]. Available: https://colombiatic.mintic.gov.co/679/articles-6276_archivo_pdf.pdf.
- [14] L. Vanstor, "Residential Broadband Forecast," 2002.
- [15] O. Van Deventer, P. Van Dam, P. Peters, and F. Vermaerke, "Evolution Phases to an Ultra-Broadband Access Network: Results from ACTS-PLANET," *IEEE Commun. Mag.*, 1997.
- [16] TechNet, "A National Imperative: Universal Availability of Broadband by 2010," 2002.

- [17] CSPP, "Building the Foundation of the Networked World. A Vision for 21st Century Wired and Wireless broadband. Washington," Washington, 2002.
- [18] Stordahl, K. Kalhagen, and B. K. Olsen, "Access Technology Demand in Europe," in *ICFC*, 2002.
- [19] Leif Aarthur Ims, *Introduction Strategies and Techno-economic Evaluation*. London: Chapman&Hall, 1998.
- [20] R. Ramaswami, K. Sivarajan, and G. Sasaki, *Optical Networks*, Third Edit. Morgan Kaufmann, 2010.
- [21] Padtec, "Tecnología DWDM," Campinas, 2013.
- [22] S. Kumar and M. J. Deen, *Fiber Optics Communications, Fundamentals and Applications*. Wiley, 2014.
- [23] C. Systems, "Introduction to DWDM Technology," 2001.
- [24] ITU-T, "Recommendation G.652 - Characteristics of a single-mode optical fibre and cable," 2016.
- [25] ITU-T, "Recommendation G.653 - Characteristics of a dispersion-shifted, single-mode optical fibre and cable," 2010.
- [26] ITU-T, "Recommendation G.655 - Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable," 2009.
- [27] ITU-T, "Recommendation G.694.1 - Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid," 2012.
- [28] ITU-T, "Recommendation G.957 - Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy," 2006.
- [29] D. Borne, Van Den, "Robust Optical Modulation and Equalization," Technische Universiteit Eindhoven, 2008.
- [30] Malin Premaratne and G. P. Agrawal, *Light Propagation in Gain Media: Optical Amplifiers*. New York: Cambridge University Press, 2011.
- [31] P. . Becker, N. . Olsson, and J. . Simpson, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers, Fundamentals and Technology*. 1999.
- [32] Clifford Headley and G. P. Agrawal, *Raman Amplification in Fiber Optical Communication System*. Elsevier Academic Press, 2005.
- [33] T. Kamiya, F. Krausz, B. Monemar, H. Venghaus, H. Weber, and H. Weinfurter, *Raman Amplifiers for Telecommunications 1, Physical Principles*. Springer, 2004.
- [34] S.Namiki and Y. Emori, "Broadband Raman amplifiers design and practice," *Opt. Amplifiers Their Appl. OSA Tech. Dig. Washingt. DC Opt. Soc. Am.*, 2000.
- [35] S. v. Kartalopoulos, "INTRODUCTION TO DWDM TECHNOLOGY - Data in a Rainbow," Wiley, 2000.
- [36] C. F. G. Alegria, "All-Fibre Devices for WDM Optical Communications," University of Southampton, 2001.

- [37] C. Pulikkaseril, L. A. Stewart, A. F. Roelens, G. W. Baxter, S. Poole, and S. Frisken, "Spectral modeling of channel band shapes in wavelength selective switches," *Opt. Express*, vol. 19, no. 9, pp. 3536–3542, 2011.
- [38] H. Yang, B. Robertson, D. Yu, Z. Zhang, and D. P. Chu, "Origin of Transient Crosstalk and Its Reduction in Phase-only LCOS Wavelength Selective Switches," *J. Light. Technol.*, vol. 31, no. 23, pp. 3822–3829, 2013.
- [39] OIF, "Flex Coherent DWDM Transmission Framework Document - OIF-FD-FLEXCOH-DWDM-01.0," 2017.
- [40] J. Berthold *et al.*, "Optical Networking: Past , Present , and Future," vol. 26, no. 9, pp. 1104–1118, 2008.
- [41] ITU-T, "Recommendation G.707 - Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH) ITU-T," 2007.
- [42] ITU-T, "Recommendation G.691 - Optical interfaces for single channel STM-64 and other SDH systems with optical amplifiers," 2006.
- [43] IEEE, "IEEE Std 802.3-2015," 2016.
- [44] ITU-T, "Recommendation G.709 - Interfaces for the optical transport network," 2016.
- [45] ITU-T, "Recommendation G.872 - Architecture of optical transport networks," 2017.
- [46] ITU-T, "Recommendation G.975.1 - Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine systems," 2004.
- [47] ITU-T, "Supplement 39 - Optical system design and engineering considerations," 2016.
- [48] Corning, "Low Signal Latency in Optical Fiber Networks," 2011.
- [49] Infinera, "Low Latency – How Low Can You Go?," 2016.
- [50] M. M. Ismail, M. A. Othman, Z. Zakaria, M. H. Misran, M. A. M. Said, and H. A. Sulaiman, "EDFA-WDM Optical Network Design System," *Procedia Eng.*, vol. 53, pp. 294–302, 2013.
- [51] Cisco, "Cisco Digital CFP2 Pluggable Optical Module," 2018.
- [52] ARISTA, "ARISTA 7280R DWDM Data Sheet," 2018.
- [53] OIF, "Technology Options for 400G Implementation," 2015.
- [54] A. S. Thyagaturu *et al.*, "Software Defined Optical Networks (SDONs): A Comprehensive Survey," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. 4, pp. 2738–2786, 2016.
- [55] H. Raza, "A Brief Survey of Radio Access Network Backhaul Evolution: Part II," *IEEE Commun. Mag.*, no. May, pp. 170–177, 2013.
- [56] H. Raza, "A Brief Survey of Radio Access Network Backhaul Evolution: Part I," *IEEE Commun. Mag.*, no. June, pp. 164–171, 2011.
- [57] A. Checko *et al.*, "Cloud RAN for Mobile Networks — A Technology Overview," *IEEE Commun. Surv. TUTORIALS*, vol. 17, no. 1, pp. 405–426, 2015.

- [58] M. Jaber *et al.*, “5G Backhaul Challenges and Emerging Research Directions : A Survey,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1743–1766, 2016.
- [59] C. Kachris, K. Bergman, and Ioannis Tomkos, *Optical Interconnects for Future Data Center Networks*. Springer, 2013.
- [60] V. Eramo, M. Listanti, R. Sabella, and F. Testa, “Data Center Energy Consumption Modeling: A Survey,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. 1, 2016.
- [61] A. Research, “2018 Optical DCI Reach Segmentation Update,” 2018. [Online]. Available: <https://www.acgcc.com/2018-optical-dci-reach-segmentation-update/>.
- [62] H. Adams, “Optical Networks - Quarterly Analyst Conference Call – Q4 2017,” 2018.
- [63] ANSI, “TIA-942-A - Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers,” 2012.
- [64] IDTExpress, “What Are Tier 2 Carriers?,” 2018. [Online]. Available: <https://www.idtexpress.com/blog/2018/01/29/what-are-tier-2-carriers/>.
- [65] A. Lucent, “Data Center linterconnect Market Trends and Requirements,” 2014.
- [66] G. Nicholl, M. Nowell, R. Baca, B. Booth, and M. Filer, “Microsoft 100G/400G Coherent use case,” 2018.
- [67] M. Weber *et al.*, “Towards an objective for 400 Gb/s for DCI applications,” 2018.
- [68] S. K. Korotky, “Network Global Expectation Model: A Statistical Formalism for Quickly Quantifying Network Needs and Costs,” vol. 22, no. 3, pp. 703–722, 2004.
- [69] R. R. Reyes and T. Bauschert, “Bottom-up framework for cost allocation to services in telecommunication networks Case study : cost allocation for flex-grid optical networks,” vol. 70, pp. 81–105, 2017.
- [70] T. António and G. M. Tossi Belleffi, *Optical Transmission, The FP7 BONE Project Experience*. Springer, 2012.
- [71] S. Bodamer, E. Gmbh, and D. Reviol, “Resilient IP Backbone Network Solutions for a Realistic German Network Scenario Resilient IP Backbone Network Design,” in *8th ITG Workshop on Photonic Networks*, 2007.
- [72] M. Ruffini, D. Kilper, D. O. Mahony, and L. Doyle, “Cost Study of Dynamically Transparent Networks,” in *OFC/NFOEC 2008*, 2008, pp. 8–10.
- [73] F. Rambach *et al.*, “A Multilayer Cost Model for Metro / Core Networks,” vol. 5, no. 3, pp. 210–225, 2013.
- [74] R. Huelsermann, M. Gunkel, C. Meusburger, and D. A. Schupke, “Cost modeling and evaluation of capital expenditures in optical multilayer networks,” vol. 7, no. 9, pp. 814–833, 2008.
- [75] J. L. Vizcaíno, Y. Ye, and P. M. Krummrich, “Cost Evaluation of Amplification Strategies for WDM Mixed-Line-Rate Networks,” no. Table 1, pp. 15–18, 2015.
- [76] J. L. Vizcaíno, Y. Ye, T. Jiménez, and V. López, “OTN Switching in Protected Transport Networks : Spectral , Cost and Energy Efficiency Evaluation,” 2016.
- [77] J. L. Vizcaíno, Y. Ye, V. López, F. Jiménez, R. Duque, and P. M. Krummrich, “Cost

Evaluation for Flexible-Grid Optical Networks,” pp. 358–363, 2012.

- [78] V. López *et al.*, “Finding the Target Cost for Sliceable Bandwidth Variable Transponders,” *J. OPT. COMMUN. NETW*, vol. 6, no. 5, pp. 476–485, 2014.
- [79] Rudolph Frederick Stapelberg, *Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design*. Springer-Verlag London Limited, 2009.
- [80] Mark L. Ayers, *TELECOMMUNICATIONS SYSTEM RELIABILITY ENGINEERING , THEORY , AND PRACTICE*. John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [81] TeleGeography, “Submarine Cable Map 2018,” 2018. [Online]. Available: <https://submarine-cable-map-2018.telegeography.com/>.