

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
INSTITUTO DE ELECTRÓNICA APLICADA**



**ESPECIFICACIONES PARA LA INTERCONEXIÓN E
INTEROPERABILIDAD EN REDES DWDM A NIVEL DE
TRANSPORTE DE CAPA ÓPTICA LAMBDA ALIEN**

*Tesis de Grado presentado para optar al Título de
"Magister Scientiarum en Ingeniería en Redes de
Comunicación"*

AUTOR: OSCAR ANGEL VALENCIA CRUZ

TUTOR: M.SC. ING. IVAN ROGER CACERES ANGULO

**IEA-UMSA
LA PAZ-BOLIVIA
2023**



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

Agradecimientos

- *A Dios por ser escudo y luz para mi vida y mi familia a lo largo de estos años.*
- *A mi esposa Jimena y mis hijos Camilita y Angel, que me apoyaron en todo momento.*
- *A los Docentes de la maestría de Ingeniería electrónica por todo el conocimiento transmitido y apoyo. Ing. Iván Cáceres, Ing. Edgar del Carpio e Ing. Omar Ramírez.*

Resumen

Las redes de transporte DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) se utilizan para brindar gran capacidad de transporte Mbps (Megabits por segundo), estas capacidades son requeridas principalmente por operadores de servicio que brindan servicios de internet, telefonía, servicios de datos y voz.

A partir de la implementación de redes 3G y redes de internet de banda ancha el crecimiento de ancho de banda agregado demanda escalabilidad en la red de transporte. Lo anterior implica una inversión por parte del operador para hacer el mejoramiento de una red existente o la implementación de una red nueva para cubrir el crecimiento de la red, a esto se suma el crecimiento natural de ampliaciones de servicios que agregan **tráfico** de red. La ingeniería de tráfico brinda los requerimientos de crecimiento de la red a mediano y largo plazo, esto significa que se debe implementar o ampliar capacidades.

Aunque una solución para reducir costos de implementación y operación de una red propia es la solución denominada **Lambda Alien LA** (*en adelante se denominará LA a Lambda Alien*), donde a nivel de capa óptica (fotónica) se inyecta una portadora DWDM (longitud de onda) a la capa óptica de otra red DWDM ya operativa, se deben conocer todos los aspectos requeridos de interoperabilidad entre los equipos de cada red, el estudio e investigación de la adaptación requerida y la sintonización dentro de la jerarquía óptica es necesario para conocer los límites de la interoperabilidad entre redes DWDM antiguas y nuevas, redes DWDM de distintos fabricantes, redes DWDM de distintas topologías y capacidades.

Conocer el estudio de la interoperabilidad LA permitirá alcanzar mejor el diseño de una red DWDM aplicando la solución Lambda Alien en redes activas de diferentes características.

Palabras Clave: DWDM. Internet. Tráfico de red. Capa óptica. Multiplicación. Lambda alien.

Abstract

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) transport networks are used to provide high Mbps (Mega Bits per second) transport capacity, these capacities are mainly required by service operators that provide internet, telephony, data and voice services.

From the implementation of 3G networks and broadband internet networks, the growth of aggregate bandwidth demands scalability in the transport network. The foregoing implies an investment by the operator to improve an existing network or implement a new network to cover network growth, added to this is the natural growth of service expansions that add network traffic. Traffic engineering provides the requirements for network growth in the medium and long term, this means that capabilities must be implemented or expanded.

Although a solution to reduce implementation and operation costs of a proprietary network is the so-called Lambda Alien (LA) solution where at the optical layer level (photonics) a DWDM carrier (wavelength) is injected into the optical layer of another DWDM network. already operational, all the required aspects of interoperability between the equipment of each network must be known, the study and investigation of the required adaptation and the tuning within the optical hierarchy is necessary to know the limits of interoperability between old and new DWDM networks, DWDM networks of different manufacturers, DWDM networks of different topologies and capacities.

Knowing the study of LA interoperability will allow to better achieve the design of a DWDM network by applying the Lambda Alien solution in active networks with different characteristics.

Keywords: DWDM, internet, network traffic, optical layer, multiplication, alien wavelength.

Índice General

Agradecimientos.....	ii
Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
Índice General.....	v
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tablas.....	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Planteamiento de problema.....	4
1.2.1 Delimitación del problema.....	4
1.2.2 Objeto de estudio.....	4
1.2.3 Campo de acción.....	4
1.2.4 Justificación.....	5
1.3 Objetivos.....	6
1.3.1 Objetivo general.....	6
1.3.2 Objetivos específicos.....	6
1.4 Hipótesis.....	6
1.5 Límites y alcance.....	7
1.6 Diseño metodológico.....	7
1.6.1 Formulación de la construcción teórica.....	7
1.6.2 Tipo de investigación.....	8
1.6.3 Métodos de investigación.....	8
2. MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 Jerarquía en redes de transporte.....	11
2.1.1 Medios de transmisión de Redes Backbone.....	12
2.2 Redes de transmisión en redes Backbone.....	13
2.2.1 Red de transporte Backbone (BB) y Backhaul (BH).....	13
2.2.2 Topología en redes de transporte Backbone (BB) y Backhaul (BH).....	14
2.2.3 Planificación de tráfico de redes Backbone.....	15
2.2.4 Diseño de enlaces de transporte Backbone y Backhaul.....	16
2.3 Redes DWDM.....	17
2.3.1 Características de la Fibra Óptica.....	17
2.3.2 Transmisión a través de la Fibra Óptica.....	19
2.3.2.1 Pérdidas por fenómenos de atenuación y dispersión.....	19
2.3.2.2 Ventanas de trabajo y ancho de banda.....	20
2.3.3 Tecnologías de multiplexación de señales ópticas.....	22
2.3.3.1 Multiplexación CWDM.....	24
2.3.3.2 Multiplexación DWDM.....	25
2.3.4 Componentes de una red DWDM.....	28
2.3.5 Diseño de redes ópticas DWDM.....	30
2.3.5.1 Diseño y cálculo de presupuesto de potencia óptica.....	31
2.3.5.2 Capacidad de ancho de banda DWDM.....	34

2.3.5.3	Diseño a nivel de ruido óptico	35
2.3.5.4	Planeación de topología, equipos y tarjetas	35
2.3.5.5	Planeación de la red de Fibra Óptica	37
3.	CAPA FOTÓNICA DWDM	40
3.1	Transmisión óptica	40
3.1.2	Modulación DWDM.....	40
3.2	Arquitectura de redes ópticas OTN	43
3.2.1	Jerarquía OTH y estructura de trama OTN	43
3.2.2	Velocidad de bits tramas OTN	46
4.	DISEÑO DE LAMBDA ALIEN EN DWDM.....	49
4.1	Bloques de Lambda Alien.....	50
4.1.1	Dominio Lambda Alien (dominio LA).....	51
4.1.2	Dominio nativo (Host).....	52
4.1.3	Capa de adaptación	54
4.2	Diseño de los dominios	56
4.2.1	Diseño de presupuesto óptico	57
4.2.2	Diseño de OCh entre dominios Lambda Alien.....	60
4.2.3	Diseño de ancho de banda en dominio Lambda Alien.....	61
4.2.4	Diseño en la capa de adaptación Lambda Alien	62
5.	INTERCONEXION E INTEROPERABILIDAD DWDM EN LAMBDA ALIEN.....	64
5.1	Capa de transporte óptico Lambda Alien	64
5.2	Especificaciones técnicas para la interconexion	65
5.2.1	Single-Carrier DWDM en el dominio Lambda Alien.....	65
5.2.2	Capa óptica en el dominio nativo	68
5.2.2.1	Multiplexores DWDM.....	68
5.2.2.2	Multiplexores ópticos ADD-DROP	70
5.2.3	Parámetros de la interconexión Lambda Alien	73
5.2.3.1	Interoperabilidad de capa óptica Multi-vendor.....	74
5.2.3.2	Parámetros de interconexión Lambda Alien	79
5.2.3.3	Valores recomendados de los parámetros Lambda Alien	93
5.2.4	Interconexión Lambda Alien en redes legacy DWDM.....	99
5.3	Convergencia e interoperabilidad en la capa optica DWDM	101
5.3.1	Convergencia OTN.....	102
5.4	Tipos de equipos DWDM para Lambda Alien.....	104
5.4.1	Equipos y tarjetas DWDM para dominio Lambda Alien	106
5.4.1.1	Modelos de transponders modulares por fabricantes	107
5.4.1.2	Tipos de transceivers DWDM y modelos.....	114
5.4.1.3	Transponder desagregados para Lambda Alien	118
6.	SINTONIZACION, ECUALIZACION Y GESTION DE RED EN LAMBDA ALIEN	122
6.1	Sintonización de la señal Lambda Alien	122
6.1.1	Analizador de espectro óptico.....	124
6.1.1.1	Analizador de espectro Pol-Mux.....	127
6.1.2	Sintonización con analizador de espectro óptico	128
6.2	Ecualización de dominio Lambda Alien.....	129
6.2.1	Potencia de inyección Lambda Alien.....	130
6.2.2	Medición de potencia en dominio nativo	132

6.2.3	Medición de potencia en punto de referencia Rs.....	135
6.3	Medición de OSNR en la ruta óptica e interfaces Ss y Rs	136
6.4	Medición de parámetros de interconexión Lambda Alien.....	140
6.4.1	Mediciones complementarias con analizador de espectro.....	140
6.4.2	Medición con analizador de modulación óptica.....	141
6.4.3	Medición de dispersión cromática.....	142
6.4.4	Medición de pérdida y reflectancia en Ss-Rs	144
6.5	Certificación de lado cliente en dominio Lambda Alien.....	145
6.5.1	Pruebas de bit error rate con BERT.....	145
6.5.2	Pruebas RFC2544 y Y.1564.....	149
6.6	Gestión de la red	152
6.6.1	Gestión delimitada por el dominio	152
6.6.2	Gestión fuera de banda compartida	154
6.6.3	Responsabilidad de control de la red.....	155
7.	ANÁLISIS DE COSTOS EN LAMBDA ALIEN	158
7.1	CAPEX de implementación de redes DWDM	158
7.1.1	Costos de implementación de equipos de Red DWDM.....	159
7.1.2	Costos de implementación de red de Fibra Óptica	160
7.1.3	Costos total de implementación de red DWDM	160
7.2	OPEX en una red DWDM.....	161
7.2.1	Costo de monitoreo de red.....	161
7.2.2	Costos de mantenimiento de red DWDM.....	162
7.2.3	Costos de repuestos de red DWDM.....	163
7.2.4	Costo de emplazamiento de nodos	164
7.2.5	Costo de soporte técnico	165
7.2.6	Costo total OPEX de una red DWDM	165
7.3	Análisis comparativo de costos.....	166
7.3.1	Diferencias de costos de implementación Lambda Alien	166
7.3.2	Ahorro en CAPEX/OPEX de solución Lambda Alien.....	168
7.3.3	Costo de arrendamiento en Lambda Alien	171
7.3.4	Ejemplo análisis comparativo de costos La Paz-Desaguadero	172
7.3.4.1	Comparativo de CAPEX DWDM vs. Lambda Alien	172
7.3.4.2	Comparativo de OPEX DWDM vs. Lambda Alien.....	176
7.3.5	Tasa de retorno de inversión en Lambda Alien	180
7.3.6	Reducción de costos en Lambda Alien.....	183
8.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE LAMBDA ALIEN	185
8.1	Ventajas y desventajas.....	185
8.2	Uso de Lambda Alien en redes DWDM.....	187
8.3	El futuro de la interoperabilidad en redes ópticas	188
8.3.1	Open optical line system.....	188
8.3.2	Shared spectrum o espectro alien	190
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	192
9.1	Conclusiones	192
9.2	Recomendaciones.....	193
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	194
	ANEXOS	198

Lista de Figuras

Figura 1 – Crecimiento de Tráfico total de internet por año.....	10
Figura 2 – Tecnologías de Redes Móvil IP.....	11
Figura 2.1 –Clasificación de las redes de comunicación.....	12
Figura 2.2 –Topologías de Redes de transporte.....	14
Figura 2.3 –Módulo SFP 1Gbps 10km.....	16
Figura 2.4 –Cable de Fibra Óptica.....	17
Figura 2.5 –Propagación en Fibra Óptica.....	18
Figura 2.6 –Curva coeficiente de atenuación vs Bandas Espectro Óptico.....	22
Figura 2.7–Red WDM con 4 canales.....	23
Figura 2.8–Espectro de canales CWDM según la ITU-T G.694.2.....	24
Figura 3 – Evolución de tecnologías DWDM.....	25
Figura 4 – Comparación del espectro en DWDM y CWDM.....	26
Figura 5 – Portadora DWDM espaciamiento 0,8nm (100GHz).....	28
Figura 6 – Componentes y sub-sistemas de una red DWDM.....	28
Figura 6.1 – Arquitectura de Redes DWDM.....	29
Figura 6.2 – Pérdidas en señales ópticas.....	33
Figura 6.4 – Enlace de Fibra Óptica.....	37
Figura 7 – Jerarquía Óptica OTH.....	43
Figura 7.1 – Estructura de Línea OTN.....	44
Figura 8 – Estructura de trama OTN en DWDM.....	46
Figura 8.1 – Estructura de multiplexación OTN.....	47
Figura 9 – Diagrama de técnica Lambda Alien.....	50
Figura 10 – Características transponder DWDM.....	52
Figura 11 – Características Multiplexor DWDM.....	53
Figura 12 – Ejemplo de Capa de adaptación en Lambda Alien.....	54
Figura 13 – Tipos de conectores fibra óptica.....	55
Figura 14 – Cableado entre dominios.....	55
Figura 14.1 – Diseño de Potencia en Dominios LA.....	59
Figura 15 – Habilitadores Tecnológicos para mejora de capacidad DWDM.....	66
Figura 15.1 – Proyección de puertos DWDM por capacidad.....	67
Figura 15.2 – Modelo Multiplexor DWDM Activo.....	69
Figura 15.3 – Modelo Multiplexor en Chassis DWDM.....	70
Figura 15.4 – Iconos de elementos en redes DWDM.....	71
Figura 15.5 – Funcionamiento de Multiplexores OADM.....	71
Figura 16.1 – Esquema Anillo de Interacción con Dominio Nativo.....	75
Figura 16.2 – Excursión espectral máxima para señales NRZ.....	81
Figura 16.3 – Excursión espectral máxima para señal DP-DQPSK.....	82
Figura 16.4 – Relación de métrica EVM para una constelación.....	84
Figura 16.5 – Máxima ondulación o rizo de señal LA.....	86
Figura 16.6 – Red DWDM Legacy 2.5G.....	99
Figura 16.7 – Red DWDM Legacy 10G.....	100
Figura 17 – Convergencia en OTN.....	103

Figura 18 – Convergencia de servicios OTN.....	103
Figura 19 – Equipo DWDM en Chasis Monolítico.....	104
Figura 20 – Modelos Chasis DWDM NOKIA.....	107
Figura 21 – Modelos Chasis DWDM CIENA.....	109
Figura 22 – Modelos Chasis DWDM CISCO.....	110
Figura 23 – Tipos y dimensiones de CFP, CFP2 y CFP4.....	115
Figura 24 – Modulación en Transceiver DWDM vs Distancia en km.....	115
Figura 25 – Transceiver DWDM en tipo de forma QSFP28.....	117
Figura 26 – Transponder Modular/Desagregado DWDM.....	118
Figura 27 – Transponder Modular/Desagregado DWDM PacketLight PL-200oM.....	119
Figura 28 – Transponder Modular/Desagregado Edge-Core Modelo AS7716-24SC.....	120
Figura 29 – Parámetros en Medición de Analizador de Espectro Óptico OSA.....	125
Figura 30 – Puntos de medición posibles con Analizador de Espectro óptico.....	125
Figura 31 – Equipo Analizador de espectro óptico OSA Exfo.....	126
Figura 32 – Medición para sintonización con equipo OSA.....	128
Figura 33 – Verificación de Nivel de potencia Tx y Rx en dominio LA.....	131
Figura 34 – Medición de potencia óptica en la red nativa.....	132
Figura 35 – Medición de potencias con equipo OSA.....	134
Figura 36 – Verificación de Nivel de potencia Rx en dominio LA.....	135
Figura 36 – Representación de medición OSNR.....	136
Figura 37 – Medición con analizador de espectro óptico OSA.....	138
Figura 38 – Medición de DGD en la ruta de transporte óptico Ss-Rs.....	143
Figura 39 – Medición con OTDR DWDM.....	144
Figura 40 – Medición de BER en la solución lambda alien.....	146
Figura 41 – Medición con instrumento BERT en la solución lambda alien.....	147
Figura 42 – Medición con instrumento BERT para transponder 100G OTU4.....	148
Figura 43 – Pruebas RFC2544 vs Y.1564 con diferentes servicios.....	151
Figura 44 – Monitoreo de niveles ópticos y OSNR en gestor DWDM.....	153
Figura 45 – Ventajas de un sistema de gestión unificado.....	155
Figura 46 – Diagrama de Red DWDM La Paz-Desaguadero (Caso de Red Propia).....	173
Figura 47 – Diagrama de Red DWDM La Paz-Desaguadero (Caso Lambda Alien).....	173
Figura 48 – Escenario futuro de Open OLS para DWDM.....	189

Lista de Tablas

Tabla 1 – Banda de trabajo en Fibra Óptica	21
Tabla 2 – Grilla de canales DWDM Banda C -100GHz.	27
Tabla 3 – Capacidades SONET/SDH.	34
Tabla 4 – Clasificación de tipos de Modulación por tipo de Técnica de detección.	41
Tabla 5 – Velocidad de Línea de señales OTUk.	46
Tabla 6 – Nro. Señales máximo ODUk en OTUk.	47
Tabla 7 – Ejemplo de Diseño de Potencia LA.....	59
Tabla 8 – Códigos de aplicación para interconexión DWDM.....	78
Tabla 9 –Valores de Interconexión LA en señal de 100G Narrow.	94
Tabla 10 –Valores de Interconexión LA en señal de 100G Wide.....	95
Tabla 11 – Valores de Interconexión LA 10G con FEC y canal de 100GHz.	97
Tabla 12 – Valores de Interconexión LA 10G con FEC y canal de 50GHz.	98
Tabla 13 –Modelos de Chasis DWDM NOKIA para solución Lambda Alien.....	107
Tabla 14 –Modelos de Transponder NOKIA para solución Lambda Alien.	108
Tabla 15 –Modelos de Chasis CIENA para solución Lambda Alien.	108
Tabla 16 –Modelos de transponder CIENA para solución Lambda Alien.....	109
Tabla 17 –Modelos de chasis CISCO para solución Lambda Alien.....	110
Tabla 18 –Modelos de Transponder CISCO para solución Lambda Alien.....	111
Tabla 23 –Modelos de transceiver CFP/CFP2 para solución Lambda Alien.....	116
Tabla 24 –Modelos de transceiver Prolabs para solución Lambda Alien.....	117
Tabla 25 –Modelos de transceiver 10G/40G para solución Lambda Alien.	118
Tabla 26 –Especificaciones de Transponder PacketLight Modelo PL-2000M.	119
Tabla 27 –Especificaciones de Transponder Edge-Core Modelo AS7716-24SC.....	120
Tabla 28 –Parámetros de frecuencia central para la sintonización.....	123
Tabla 29 –Método de medición OSNR por tipo de modulación.	127
Tabla 30 –Parámetros de Potencia para la Ecuilibración.....	129
Tabla 31 –Parámetros y medición de OSNR en la solución Lambda Alien.....	137
Tabla 32 –Mediciones complementarias con Analizador de Espectro Óptico.....	140
Tabla 33 –Medición con Analizador de Modulación Óptica.	142
Tabla 34 –Medición con Analizador de Dispersión Cromática.	143
Tabla 35 –Medición con OTDR DWDM.	144
Tabla 36 –Ejemplo Resumen de Medición BER enlace 10Gbps.....	149
Tabla 37 –Resumen de Pruebas RFC2544 vs Y.1564.	151
Tabla 38 –Comparativo de Costos CAPEX en Lambda Alien.	168
Tabla 39 –Comparativo de Costos CAPEX en Lambda Alien.	170
Tabla 40 –Análisis de Costos CAPEX Ejemplo Red La Paz-Desaguadero.	175
Tabla 41 –Comparativo de Costos CAPEX Ejemplo Red La Paz-Desaguadero.	175
Tabla 42 –Análisis de Costos OPEX Ejemplo Red La Paz-Desaguadero.....	178
Tabla 43 –Análisis de Costos alquiler de un Circuito de 10G en Bolivia.....	178
Tabla 44 –Comparativo de Costos OPEX Ejemplo Red La Paz-Desaguadero.....	179
Tabla 45 –Análisis de ROI Ejemplo Red La Paz-Desaguadero.	182
Tabla 46 –Reducción de costos Ejemplo Red La Paz-Desaguadero.	183

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la creciente demanda de ancho de banda a nivel de servicios e internet hace que los operadores de servicio deban optimizar constantemente sus redes de acceso y agregación para poder atender una demanda de crecimiento constante. A nivel de redes backbone¹ son necesarios la implementación y operación de redes DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) para brindar altas capacidades de ancho de banda.

La implementación de redes DWDM además del costo de implementación de la fibra óptica en distancias de 100km o mayores y los equipos en nodos principales y repetidores hace que el gasto en CAPEX (gastos en capital) sean bastante elevados para los operadores, a esto se suma posteriormente los costos de OPEX (gastos de operación) que deben sumarse mientras dure la operación de una red de transporte basado en la solución DWDM.

Una solución al despliegue de redes DWDM es el uso de la capa óptica de otro operador para reducir gastos en CAPEX/OPEX de una red DWDM propia, a esta solución se le denomina lambda alien y permite desplegar redes DWDM de alta capacidad sin implementar una capa de multiplexación DWDM, amplificación y red de fibra óptica propia.

Se realizará el estudio de los parámetros de transmisión óptica, fabricantes de equipos que lo soportan, capacidades de ancho de banda que puede llegar a soportar, ventajas y limitaciones de lambda alien, tecnologías que pueden soportar la interconexión e interoperabilidad a nivel de capa óptica, así como un análisis costo-beneficios que puede representar tanto para el operador que usa capa óptica de otro, como los costos de alquiler para aquel que prestaría servicios de transporte en capa óptica.

Por lo general las redes DWDM siempre son diseñadas para tener gran escalabilidad a nivel de ancho de banda y longitudes de onda a nivel óptico, capaces de trabajar en los estándares de transporte ITU-T G.962 y dar una solución al crecimiento de ancho de banda de hasta unos 10 años, la solución lambda alien cumple con las mismas características.

¹ Backbone, Red de transporte entre elementos de la red de núcleo o elementos principales.

1.1 Antecedentes.

Un operador de telecomunicaciones necesita desplegar frecuentemente nuevas redes de transporte para ampliar nuevas zonas donde desea brindar servicio y hacer ampliaciones de capacidad a aquellos donde necesita mayor ancho de banda, estos dos puntos significan que las redes de transporte deben tener un ancho de banda escalable y puedan ser optimizados a través de la ingeniería de tráfico, la cual evalúa los crecimientos a futuro [1][2].

Actualmente existe una tendencia globalizada de crecimiento de la demanda de ancho de banda y los servicios, para atenderlo se debe ampliar las redes de transporte, acceso y núcleo tanto en capacidad como en tecnología [3][4][5].

Cuando se requiere la implementación de una red de transporte, generalmente la evaluación del tipo de red que se necesita viene de la mano de la necesidad comercial existente, es decir la proyección de costo/beneficio de la implementación y operación de una red nueva vs los ingresos/pérdidas que puede llegar a generar.

A nivel de redes de acceso generalmente las opciones son la implementación de redes metroethernet, redes de microondas y redes satelitales. El costo de implementación de redes de acceso con solución metroethernet es una de las más bajas, excepto por la implementación de red de fibra óptica que dependiendo de las distancias entre nodos puede llegar a encarecer un proyecto, siguiendo esta la implementación de una solución por red microondas que tiene gran facilidad en su despliegue e instalación, pero los pagos por la asignación y uso de derecho de frecuencias hacen que sea una solución selectiva en comparación con las redes metroethernet, finalmente la implementación de una red backhaul² y de acceso con tecnología satelital, realmente tiene precios muy altos que es preferible evitar a menos que sea la última opción.

² Backhaul, Red de transporte entre la red de núcleo (backbone) y la red de acceso o borde.

A nivel de redes backbone por lo general se puede llegar a implementar enlaces Ethernet de 10Gbps (Gigabits por segundo) con redes metroethernet, se pueden implementar enlaces de microrondas de alta capacidad 10Gbps en frecuencias 60 y 80 GHz, no se considera redes satelitales para redes backbone mayores a 1Gbps.

Cuando hablamos de requerimientos de capacidades mayores a los 100 Gbps la única solución aceptable es la implementación de enlaces DWDM, siendo esta además de una solución escalable en capacidad de transporte, se convierte en la solución para poder abarcar distancias muy grandes entre nodos o estaciones (aprox. >100 km).

La solución de la implementación de una red DWDM tomando en cuenta como mínimo la conexión entre dos puntos, debe considerar una gran inversión por parte del interesado, puesto que debe desplegar fibra óptica entre las dos estaciones además del tiempo que puede llegar a representar la implementación de una red de larga distancia de fibra óptica, desde el diseño, la compra de materiales, permisos y licencias para llegar finalmente a un tendido de los cables de fibra óptica.

También se debe considerar que en el diseño de la red DWDM, las características de escalabilidad entre tener 4, 8, 16 portadoras de 100Gbps pueden ser un factor determinante entre un valor u otro, ya que por la magnitud de la inversión es preferible aumentar el costo para llegar al siguiente, esto implica siempre a los operadores que implementan redes propias DWDM, sobredimensionar sus requerimientos iniciales por el poco incremento en costos que les representa para llegar a mayores capacidades.

Según lo expuesto todos los operadores de servicios de telecomunicaciones tanto en Bolivia como en otros países, tiene el reto de ampliar sus redes de transporte tanto backbone como de acceso y esto los lleva a buscar soluciones adecuadas en cada caso que sean el equilibrio entre la inversión y el retorno de la inversión ROI (Return of investment).

1.2 Planteamiento del problema.

La problemática es la inexistencia de las especificaciones técnicas para la interconexión e interoperabilidad con la capa de transporte óptico de una red DWDM de un tercero y la falta de información para la etapa de sintonización y equalización que se requiere para la solución lambda alien, que finalmente permitirá la correcta interoperabilidad en la interconexión de distintas redes DWDM. La solución “Lambda Alien” resuelve una problemática importante en la implementación de redes DWDM propias, ya que brinda la opción de utilizar la capa óptica de otro operador y permite la reducción de costos en la implementación de enlaces de transporte de alta capacidad, para esto se requiere conocer sus especificaciones de interconexión.

1.2.1 Delimitación del problema.

Las especificaciones de interconexión e interoperabilidad de la solución LA, abordan principalmente la problemática de la falta de información técnica para el diseño e implementación de la solución LA en una red de transporte de alta capacidad, así la problemática de un análisis de costos que demuestran las ventajas de la implementar la solución LA en comparación con una solución completa DWDM.

1.2.2 Objeto de estudio.

Se realizará el estudio de los parámetros de interconexión e interoperabilidad posible en la capa óptica de redes DWDM para la solución lambda alien.

1.2.3 Campo de acción.

Es necesario realizar el estudio de las especificaciones de interconexión e interoperabilidad entre redes y equipos DWDM para el uso de la solución lambda alien, en el diseño e implementación de redes de transporte DWDM.

1.2.4 Justificación.

Los motivos principales que llevan la investigación de esta tesis tienen un fundamento principalmente tecnológico y académico ya que en la actualidad el uso y/o alquiler y/o intercambio de servicios a nivel de transporte en capa óptica no tiene especificaciones técnicas claras para su diseño e implementación, también existe poca información sobre interconexión o interoperabilidad entre redes DWDM.

Siendo nuestro país una región en crecimiento constante para las redes de servicios de internet, es decir sabemos que es necesario llevar las telecomunicaciones tanto en servicios de voz y servicios de datos, específicamente el acceso a internet a varias regiones del País, el estudio de esta solución y el conocimiento de los aspectos técnicos servirán para acortar tiempos de implementación de redes DWDM y también formará una base técnica sólida para el desarrollo a futuro de una normativa válida por la autoridad de regulación y fiscalización de telecomunicaciones y transportes ATT.

La investigación de las especificaciones de interconexión e interoperabilidad de la solución LA es factible ya que los operadores de telecomunicaciones y proveedores de internet utilizan tecnología DWDM para conectar diferentes regiones y tener gran ancho de banda tanto para redes backbone, como para redes de salida internacional de internet. El resultado de la investigación pretende dar bases sólidas para conocer esta solución de intercambio de lambdas coloreadas en redes DWDM.

Adicionalmente los operadores de telecomunicaciones actualmente brindan servicios de transporte punto a punto y multipunto con redundancia de anillos de fibra óptica, alquilando e intercambiando capacidades comunes de 1Gbps hasta uno o varios circuitos de 10Gbps, Esto representa un problema a la escalabilidad de capacidad para el operador que alquila capacidad, puesto que la ampliación siempre tiene un costo lineal, por lo cual se requieren alternativas al crecimiento de ancho de banda con mejora de costos y menores tiempos de solución.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo general.

- Elaborar las especificaciones técnicas requeridas para la interconexión e interoperabilidad en redes DWDM a nivel de transporte de capa óptica, aplicando la solución denominada lambda alien y conocer las bases técnicas necesarias, su funcionamiento a nivel de redes DWDM y la optimización de costos CAPEX/OPEX en el diseño de una solución DWDM.

1.3.2 Objetivo específico.

- Determinar los parámetros ópticos para la interconexión en la capa de transporte óptico de una red DWDM, requerimientos de equipos y diseño de implementación de una longitud de onda alienígena.
- Elaborar las características técnicas requeridas de los fabricantes de equipos DWDM que puede utilizarse en la solución lambda alien.
- Elaborar las especificaciones para la sintonización y ecualización de parámetros ópticos en la solución lambda alien que constituyen una validación técnica de la interoperabilidad.
- Demostrar la optimización de costos CAPEX/OPEX con lambda alien en comparación con una solución DWDM propia.
- Describir el futuro de la interoperabilidad entre redes ópticas DWDM.

1.4 Hipótesis.

La investigación y estudio de las especificaciones de interconexión e interoperabilidad de redes DWDM, permitirá el uso de lambda alien para el diseño de redes DWDM, optimizando el uso de recursos y costos CAPEX/OPEX en comparación con el diseño de una red DWDM propia.

1.5 Límites y alcance.

El detalle de todos los parámetros y especificaciones de interconexión e interoperabilidad en redes DWDM para interconectar longitudes de onda alienígenas estarán basadas en la información disponible tanto a nivel de estándares internacionales de la ITU-T, así como la información técnica de distintos fabricantes de tecnología DWDM. El alcance del estudio es brindar conocimientos técnicos y procedimientos de buenas prácticas para asegurar el uso confiable de lambda alien.

El alcance es poder establecer bases claras tanto técnicas como económicas de referencia que sirvan para realizar el diseño e interconexión de señales ópticas en la solución lambda alien, a los operadores de telecomunicaciones en general.

El contexto de estudio es a nivel global, es decir con la información existente a la fecha de diferentes fuentes, fabricantes y recomendaciones. El análisis de costos base se realizará para un contexto actual en las redes de operadores de servicios de telecomunicaciones.

El estudio de la interconexión y análisis de todos los parámetros de capa óptica, además de los requerimientos de sintonización de una red DWDM con lambda alien, son completamente orientado a las especificaciones requeridas para una interconexión exitosa.

1.6 Diseño metodológico.

1.6.1 Formulación de la construcción teórica.

El estudio de las especificaciones de interconexión e interoperabilidad de redes DWDM para compartir lambdas alienígenas y ser transportadas por un tercero, ayudará de forma directa a la comprensión y la inclusión en el diseño de nuevas redes DWDM. Es decir, con las bases técnicas explicadas y delimitadas se incluirán los criterios técnicos a nivel de diseño en los operadores, además la interacción entre operadores puede llevar sino a alquiler de servicios en capa óptica, también a intercambio de longitudes de onda como reemplazo al intercambio de capacidad entre operadores.

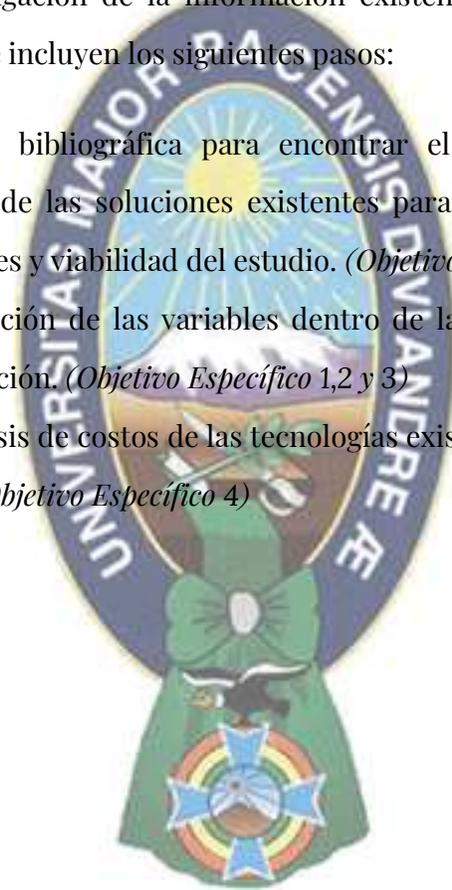
1.6.2 Tipo de investigación.

Debido a los objetivos y alcances del presente estudio, el tipo de investigación que se realizará es: investigación teórica, descriptiva y explicativa.

1.6.3 Métodos de investigación.

El método de investigación que se utilizará es el método teórico, debido a que no se realizarán pruebas reales sino investigación de la información existente tanto de recomendaciones, operadores y fabricantes, se incluyen los siguientes pasos:

- Realizar la revisión bibliográfica para encontrar el estado del arte tanto de la problemática como de las soluciones existentes para definir una taxonomía de las alternativas existentes y viabilidad del estudio. (*Objetivo Específico 1*)
- Realizar la investigación de las variables dentro de la problemática, para definir el alcance de cada solución. (*Objetivo Específico 1,2 y 3*)
- Se realizará un análisis de costos de las tecnologías existentes como soluciones viables a la problemática. (*Objetivo Específico 4*)





CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2. MARCO TEÓRICO

La evolución de la tecnología en los servicios que se ofrecen a los usuarios de internet, ha ido orientando también la evolución de las tecnologías de transporte en redes backbone, desde el aumento de capacidad en circuitos E1s y el constante requerimiento de mayores anchos de banda para servicios y aplicaciones de nueva generación. El requerimiento de servicios de datos para conexión a Internet debe soportarse sobre redes con capacidad de administración de Ethernet, IP/MPLS y servicios Carrier Ethernet [6][7][8]. A este crecimiento natural de tráfico y debido a la pandemia del 2020, se tuvo un crecimiento exponencial del tráfico generado, ya que muchas personas se volcaron a realizar trabajo y estudio de forma remota. En la figura 1 se muestra el crecimiento de tráfico total de internet por año.



Figura 1 – Crecimiento de Tráfico total de internet por año.

Fuente: Artículo Hisilicon "400G All-Scenario Optical Modules White Paper"

Actualmente a nivel mundial y en Bolivia contamos con redes LTE ya establecidas que brindan gran capacidad de ancho de banda a los usuarios, ahora bien, la suma de varias redes móviles y fijas que brindan servicio van añadiendo tráfico a la red de transporte que constantemente necesita ser optimizada y evaluar con ingeniería de tráfico los cambios o nuevos enlaces de transporte.

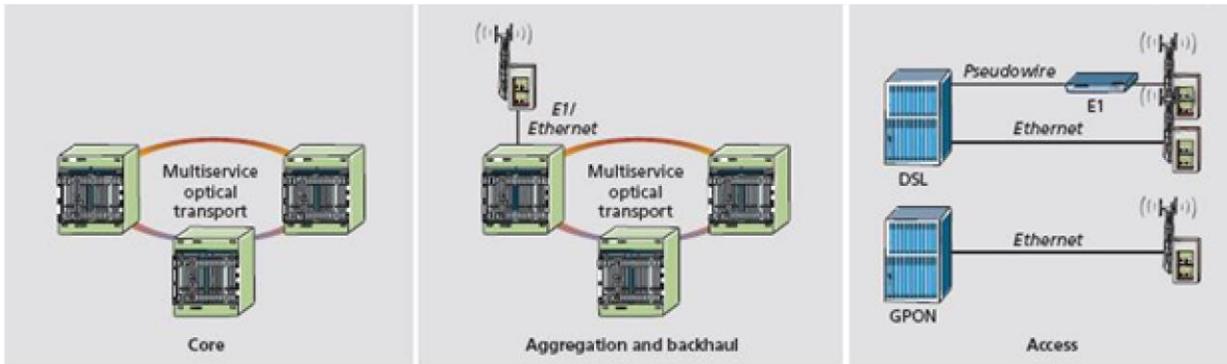


Figura 2 – Tecnologías de Redes Móvil IP.

Fuente: Alcatel-Lucent “Deploying IP/MPLS in Mobile Networks”

En la figura anterior se puede apreciar que tanto para redes de acceso como redes backbone (core) es necesario contar con redes ópticas de gran capacidad, específicamente necesitamos la implementación y operación de redes DWDM para atender la sumatoria de los servicios que se brindan tanto para redes móviles como para redes fijas de los operadores.

El crecimiento de tráfico se puede controlar mejor con un análisis de ingeniería de tráfico [17], posterior a esto como resultado podemos obtener que necesitamos realizar ampliación de capacidad en enlaces existentes o la implementación de nuevos enlaces de transporte hacia nuevos nodos de interconexión o enlaces backbone que son requeridas para interconectar diferentes localidades.

2.1 Jerarquía en redes de transporte.

Dentro de la arquitectura de una red de transporte, se clasifican en tres tipos:

1. La *Red de acceso* brinda conectividad a los usuarios finales de una red, clientes de un proveedor de servicios fijos como FTTH (Fiber to the home) o también pueden ser usuarios móviles, como en la telefonía celular, 2G hasta LTE.
2. La *Red de agregación o distribución* se encarga de unir el tráfico entre diferentes redes de acceso o conectarlo a la red backbone en caso de ser necesario, utiliza varias políticas o reglas de filtrado para elegir el correcto enrutamiento de los datos.

3. La *Red de Núcleo o Backbone* se encarga del enrutamiento eficiente y conecta diferentes redes de agregación, para cumplir su labor requiere gran ancho de banda.

La clasificación anterior se utiliza dentro de diseño jerárquico de redes y es utilizado para el diseño tanto de redes pequeñas, medianas hasta redes grandes, incluso internet mismo. En la figura 2.1 se muestra la clasificación de acuerdo con la jerarquía de redes de transporte. A continuación, podemos resumir las funciones de cada capa [18]:

- La división en capas de la red permite que el tráfico se maneje en la misma capa siempre y cuando no requiera acceder a otra red o a la siguiente capa.
- Cada capa tiene diferentes funciones por lo cual esta separación permite que el diseño, implementación y la operación pueda hacerse por capas.

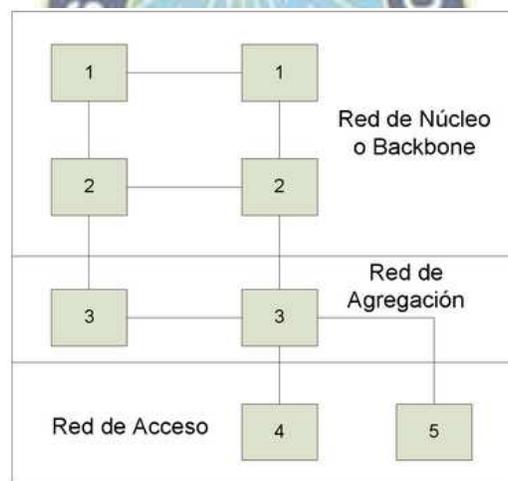


Figura 2.1 –Clasificación de las redes de comunicación.

Fuente: Elaboración Propia

2.1.1 Medios de transmisión de redes Backbone.

Dentro de la clasificación de medios de transmisión, principalmente son:

- *Medios Guiados*: Tradicionalmente los medios guiados están los cables de par trenzado, el cable coaxial y el cable de fibra óptica.
- *Medios No Guiados*: Entre los medios no guiados tenemos la transmisión vía microondas, satélite y enlaces infrarrojos, aunque este último no es muy difundido por su poca sensibilidad a los cambios de ambiente.

2.2 Redes de transmisión en redes Backbone.

La capa de núcleo o backbone brinda funciones importantes dentro de la arquitectura de una red de transporte. Aunque actualmente conocemos las redes backbone como el resultado de la convergencia de redes y multiservicios basadas en IP y MPLS completamente, aún se tiene algunas redes heredadas (legacy). Esto es debido a que muchas redes antiguas basadas en tecnología ATM (asynchronous transfer mode), TDM (Time división Multiplexing), SDH (Synchronous Digital Hierarchy), aún puede seguir funcionando, es mejor evitar el funcionamiento de redes paralelas entre un backbone legado y uno IP, que llevaría prácticamente a doblar recursos de OPEX [19].

A continuación, se muestra los componentes de una red backbone:

1. Red de Equipos de backbone: Estos pueden ser equipos como routers, switches donde se utilizan los diferentes protocolos de comunicación y enrutamiento.
2. Enlaces de transporte o red de transmisión: Los enlaces de transporte pueden ser desde un cable de red hasta un enlace óptico de muchos kilómetros.

2.2.1 Red de transporte Backbone (BB) y Backhaul (BH).

Las redes de transporte entre elementos de la red backbone están compuesta enlaces o líneas de transmisión de gran capacidad, así también en los casos de los enlaces de transmisión hacia elementos de la red de agregación /acceso que se denominan enlaces backhaul. Tanto enlaces backbone como enlaces backhaul tienen características de llevar gran tráfico de red y deben brindar alta disponibilidad y redundancia de los enlaces de transmisión, para esto se echa mano de las configuraciones posibles según las diferentes topologías existentes de una red de transporte.

Entre las características más importantes para establecer enlaces backbone/backhaul están las siguientes:

- Requerimiento de Capacidad. Existen enlaces de 1Gbps, 10Gbps, 100Gbps hasta 800Gbps en redes DWDM.
- Requerimiento de Redundancia. Por lo general se implementan enlaces **1+1**, enlace principal y redundante para casos de fallas. Existen también casos de configuración **n+1**, esto es **n** canales de transporte y un solo enlace de redundancia.
- Requerimiento de Disponibilidad. Determina la cantidad de equipos y la cantidad de enlaces de transmisión requeridos, en muchos casos para tener una confiabilidad de 99,99999%, se diseña la redundancia de tarjetas, equipos y enlaces en 1+1.

2.2.2 Topología en redes de transporte Backbone (BB) y Backhaul (BH).

La topología de redes de transporte BB y BH se basan también en las topologías de redes más conocidas, en la siguiente figura se muestra las topologías más conocidas, se explica sobre cada una de ellas sus ventajas, si se utilizan o no en redes BB/BH:



Figura 2.2 –Topologías de Redes de transporte.

Fuente: <https://conocesobreinformatica.com/topologias-de-red/> "Topologías de Red"

- Topología Anillo: Es robusta para brindar redundancia ante caída de los medios de transmisión. Esta topología es utilizada en redes BB/BH ya que requiere una cantidad equilibrada de equipos y enlaces para brindar redundancia y confiabilidad.
- Topología Bus: Está topología utiliza un medio central de transmisión el cual brinda conectividad a otros elementos de la red. Actualmente esta topología no se utiliza.

- Topología Árbol: Esta topología tiene dependencia de un nodo principal o primario de donde se tiene ramificación hacia los diferentes elementos de la red.
- Topología Estrella: Esta topología extiende la conexión a todos sus elementos, desde un nodo principal, no brinda redundancia de ningún tipo.
- Topología Malla: Esta topología brinda mucha flexibilidad de configuración para sus elementos, permite según requerimiento establecer enlaces de transmisión que no dependen del resto de equipos,
- Topología Mixta: La topología mixta puede tener anillos, mallas y árboles en sus enlaces de transmisión, brinda flexibilidad y apertura a la reingeniería de la topología.

2.2.3 Planificación de tráfico de redes Backbone.

Debido al comportamiento dinámico de una red de telecomunicaciones, las tareas de planificar, diseñar, proyectar, dimensionar y supervisar las redes backbone se debe realizar de manera constante, ya que adicionalmente a adelantarse al crecimiento de la red, este análisis permite realizar las proyecciones de CAPEX para los siguientes años, lo cual finalmente representa realizar dimensionamiento del presupuesto que cualquier operador debe reservar para su propia red.

Cuando un operador de servicios, dentro de la expansión de sus servicios por el crecimiento a nivel de última milla o por la necesidad de redes backbone para interconectar nuevas localidades e implementar redes totalmente nuevas debe realizar la planificación y diseño de un enlace backbone desde cero.

También se puede mencionar que como resultado de la ingeniería de tráfico y llegando a los límites de ampliación de capacidad en una red operativa, se puede llegar a determinar la necesidad de planificación y diseño de nuevos enlaces backbone que llegarán a reemplazar a las redes existentes, en ambos casos se llega a un diseño de una red backbone.

2.2.4 Diseño de enlaces de transporte Backbone y Backhaul.

Para el diseño de enlaces de transmisión BB/BH, se requiere inicialmente partir del requerimiento de ancho de banda lo cual limita las tecnologías de transmisión que se pueden utilizar en BB o BH. Para enlaces backhaul se requiere > 1Gbps y backbone >10Gbps.

Para enlaces **Backhaul** a partir de 1Gbps se utilizan las siguientes tecnologías de preferencia:

- *Enlaces de Microondas terrestres*, que tienen capacidades de 1Gbps hasta 2Gbps
- *Enlaces mediante transceptores de fibra óptica*, Un tipo son los módulos SFP (Small-Form Factor Pluggable) y variantes de 1Gbps-10Gbps. En la figura 2.3 se muestra un SFP.



Figura 2.3 –Módulo SFP 1Gbps 10km.

Fuente: "Página de venta de SFPs" [49]

Para enlaces **Backbone** a partir de 10Gbps se utilizan las siguientes tecnologías:

- *Enlaces mediante transceptores de fibra óptica*, como se indicó anteriormente se tiene módulos con capacidades de 10Gbps mediante fibra óptica desde 10km hasta 80km.
- *Enlaces DWDM de alta capacidad*, esta es la única opción para establecer enlaces backbone con capacidades a partir de 10-40Gbps, se pueden llegar hasta capacidades de más de 100Gbps, 800Gbps con tecnologías más avanzadas, distancias > 100km.

2.3 Redes DWDM.

En las décadas de los sesenta y de los setenta del siglo XX, aparecieron los láseres y la fibra óptica, a partir de entonces, el desarrollo de la electroóptica ha sido acelerado y se han alcanzado grandes éxitos con la aplicación de esta técnica para la construcción de todo tipo de dispositivos que permiten transmitir una gran cantidad de información a gran distancia, con total fiabilidad y seguridad [9].

2.3.1 Características de la Fibra Óptica.

Entre las características más importantes que se pueden mencionar sobre el uso de la fibra óptica, son:

- Basado en el confinamiento de la luz de espectro no visible que viaja dentro de un núcleo de vidrio, basado en la ley de Snell [20].
- Es totalmente inmune a las interferencias electromagnéticas externas o internas.
- Existen diferentes normas de cables de fibra óptica según el tipo de aplicación.
- Evita el desperdicio de nodos y reduce la necesidad de puntos de aterramiento,
- Reduce la cantidad de puntos de fallas.

Los cables de fibra óptica pueden agruparse por cantidad de hilos para brindar mayor cantidad de enlaces disponibles en el mismo cable, por esta razón en general se tienen cables de 12, 24, 48, 100 hilos. Están recubiertos por capas como se muestra a continuación:

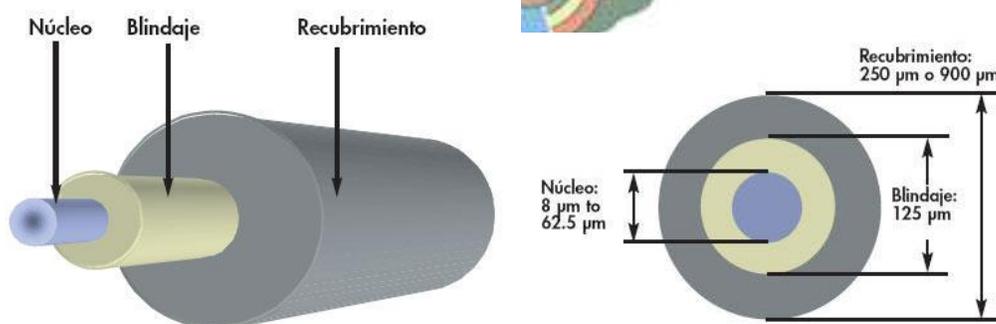


Figura 2.4 –Cable de Fibra Óptica.

Fuente: <http://lilia-garcia.blogspot.com/2012/04/tipos-de-fibra-optica.html> "Tipos de Fibra Óptica"

La clasificación de tipos de fibra óptica está dividida en dos principales categorías:

- Fibra Óptica Monomodo: Este tipo de fibra tiene un núcleo muy pequeño alrededor de 8 a 10 μm , también tiene una atenuación de señal muy baja lo cual lo hace perfecto para grandes distancias arriba de 10km. El termino monomodo hace referencia a que se inyecta una sola señal óptica en el núcleo de la fibra y alcanza grandes velocidades, se utiliza bastante en enlaces de transporte backbone y backhaul de larga distancia.
- Fibra Óptica Multimodo; En esta fibra se utilizan núcleos mayores de entre 50 a 62.5 μm , aunque no siempre su material del núcleo puede ser vidrio, sino plástico (más barato en comparación con monomodo), puede llegar a altas velocidades de 10Gbps, debido a la gran dispersión de la señal óptica tiene una gran atenuación y por ende la distancia que puede llegar a conectar entre dos puntos es menor a 500m.

En la propagación del haz de luz que se inyecta en la fibra óptica, existen varios tipos de degradaciones que afectan al haz en su recorrido hasta llegar al otro extremo, estas degradaciones pueden ser desde la rotura de la fibra óptica, el estresamiento de cable hasta el desgaste natural por viajar a través de un medio diferente como es el núcleo de vidrio de la fibra óptica, la sumatoria de las degradaciones determina un valor total de atenuación que la señal experimenta desde su nacimientos, a continuación se explica con mayores detalles las características de transmisión de señales ópticas.

En la figura siguiente se muestran los tipos de fibra óptica según su método de propagación.

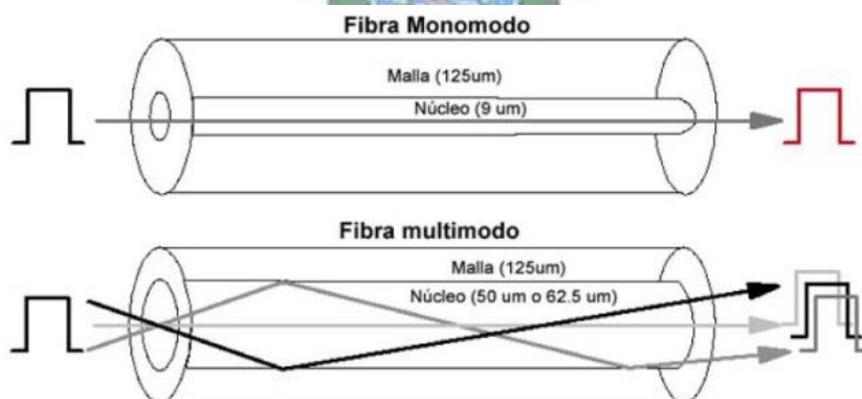


Figura 2.5 – Propagación en Fibra Óptica.

Fuente: <https://nanopdf.com/download/cables-de-fibra-optica-pdf> "Cables de Fibra Óptica"

2.3.2 Transmisión a través de la Fibra Óptica.

La transmisión de señales ópticas a través de la fibra óptica, tiene diferentes aspectos a considerar para un correcto diseño de un enlace de fibra óptica, dos de los parámetros más importantes es la atenuación y la longitud de onda del haz de luz:

- *Atenuación:* La atenuación de la señal óptica produce pérdidas la señal y afecta directamente a la distancia que la señal puede viajar, es uno de los parámetros más importante cuando se diseñan e implementan enlaces de fibra óptica. La atenuación está en decibelios (dB) y es acumulativa. a partir de la potencia inyectada P_i en la fibra óptica y la potencia de salida P_o se utiliza la fórmula siguiente:

$$A(\lambda) = 10 \text{ Log } \frac{P_o}{P_i} \text{ [dB]} \quad (1)$$

Un dato utilizado a partir de la atenuación, es el coeficiente de atenuación que se calcula con el cociente de la ecuación 1 y la longitud total L del enlace en kilómetros (km).

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{L} 10 \text{ Log } \frac{P_o}{P_i} \text{ [dB/km]} \quad (2)$$

- *Longitud de Onda λ :* La longitud de onda es un dato similar al valor de la frecuencia que se utiliza en redes microondas, pero en fibra óptica se utiliza la longitud de onda (λ en alfabeto griego), que es un valor en metros, específicamente son valores muy pequeños en el rango de los nanómetros (nm).

2.3.2.1 Pérdidas por fenómenos de atenuación y dispersión.

Adicionalmente a la atenuación, se debe aclarar que existen diferentes tipos de eventos en el comportamiento de luz cuando viaja hasta el punto de destino, eventos que producen pérdidas por atenuación y fenómenos de dispersión [21]. Entre las pérdidas por atenuación más comunes se pueden mencionar las siguientes:

- *Pérdidas Intrínsecas:* Producido por fenómenos de absorción propia del material de vidrio de la fibra óptica, aunque la pérdida es baja, existen 2 franjas de longitudes de onda que tiene más atenuación por absorción ultravioleta e infrarrojos.

- Pérdidas Extrínsecas: Producidas por fenómenos de absorción por impurezas de la fibra, curvaturas (bending) y por la molécula de agua que produce picos de atenuación.

El fenómeno de dispersión es una medida del ensanchamiento que sufre la señal óptica durante su propagación, entre los fenómenos de dispersión están las siguientes:

- Dispersión Modal: Viajan más de un modo de propagación y llegan desfasados.
- Dispersión Cromática (CD): Cuando se transmite una señal con ancho espectral y los mismos viajan a distintas velocidades llegando a un ensanchamiento.
- Dispersión por modo de Polarización (PMD): Se produce por una diferencia en las velocidades de propagación de la señal en cada polarización.

En redes DWDM existen mecanismos de compensación de la dispersión especialmente se revisa la dispersión cromática y PMD [22].

2.3.2.2 Ventanas de trabajo y ancho de banda.

Cuando la luz viaja a través de cualquier medio sufre de atenuación y va disminuyendo su potencia, en los años 1970, se empezó a utilizar una longitud de onda alrededor de los 850nm que se denominó *primera ventana*. Esta longitud de onda se utiliza en fibra multimodo, pero no tiene gran alcance <2km por su alta pérdida $\alpha(850) = 3\text{dB/km}$. Actualmente se utiliza en enlaces entre equipos de la misma sala de equipos alcanzando velocidades hasta de 10Gbps.

Posteriormente con el incremento de las distancias en que se podían construir enlaces de fibra óptica, la necesidad de una nueva ventana con menor atenuación era necesaria para llegar a mayores distancias 40 y 100km, esto se alcanzó con la mejora de los transmisores y se definió la *segunda ventana* en 1310nm con una pérdida de $\alpha(1310) = 0,34\text{dB/km}$. En esta ventana se llegan hasta velocidades 10Gbps y también se puede utilizar tecnología CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing), como antecesor de las redes DWDM.

Alrededor de 1980 los fabricantes desarrollan transmisores láser de longitud de onda de 1550nm, estos operan solamente en fibra óptica monomodo para asegurar alcance en distancia mayor a 100km con pérdidas de $\alpha(1550) = 0,2\text{dB/km}$. Esta se denomina *tercera ventana* y se

utiliza en redes DWDM, CWDM y redes Ethernet con transmisores SFP de hasta 10Gbps y distancias de 80km. Las tres ventanas se adecuaron con menor pérdida posible, evitando una alta degradación en la ventana 1380nm denominado pico de agua producido por la contaminación de ion hidroxilo (OH) [23].

En el año 2002 la organización *International Telecommunication Union* ITU-T en el afán de normalizar el uso del espectro óptico en vista del desarrollo de la tecnología DWDM, organizó y dividió por bandas el espectro óptico. Las ventanas definidas son las bandas O, E, S, C, L, U, en la tabla 1 se muestra en detalle la conformación de cada banda, rango de longitudes de onda de cada una, coeficiente de atenuaciones típicas en fibra multimodo y monomodo y las aplicaciones que se dan actualmente en cada banda.

Ventana	Banda (ITU-T)	λ (nm)	Atenuac. típica (dB/Km)	Alcance (Km)	Costo opto-electrónica	Tipo fibra	Aplicaciones
1ª (años 70)		820-900	2,5	2	Bajo	MM	10M/Gb/10Gb Eth
2ª (años 80)	O	1260-1360	0,34	40-100	Medio	MM y SM	100M/Gb/10Gb Eth, SONET/SDH, CWDM
(años 00)	E	1360-1460	0,31 (LWP)	100	Alto	SM	CWDM
(años 00)	S	1460-1530	0,25	100	Alto	SM	CWDM
3ª (años 90)	C	1530-1565	0,2	160	Alto	SM	10Gb Eth, DWDM, CWDM
4ª (años 00)	L	1565-1625	0,22	160	Alto	SM	DWDM, CWDM
(años 00)	U	1625-1675				SM	

Tabla 1 – Banda de trabajo en Fibra Óptica.

Fuente: Monografias.com “Transmisión por Fibra óptica” [24]

Un comportamiento especial es el pico de agua en la longitud de onda 1380nm que afecta a la banda E, el coeficiente de atenuación está alrededor de 1dB/km como se muestra en la figura 2.6. Para poder usar esta banda E, existe fibra óptica denominada ZWPF (Zerowater-peak-fiber), con una pérdida baja como se muestra en la figura 2.6.

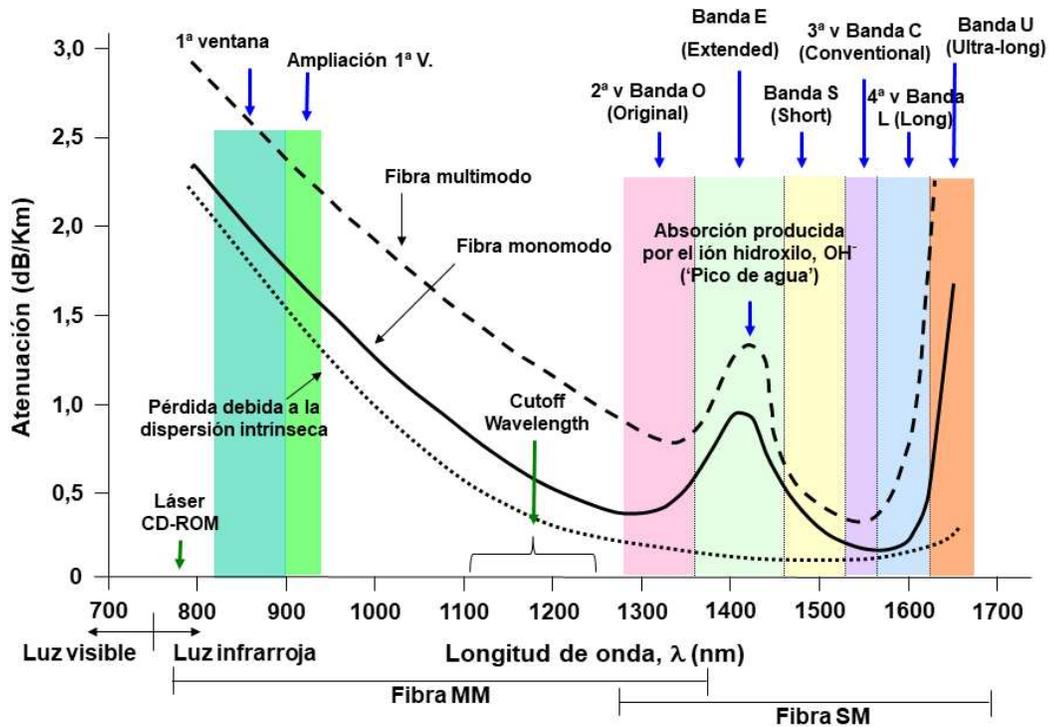


Figura 2.6 –Curva coeficiente de atenuación vs Bandas Espectro Óptico.

Fuente: https://www.aula4ic.es/redes/secuencias/h02_04_05_atenuacion.htm "Curso de Redes"

- La limitación de capacidad en *Gbps* en la fibra óptica no es limitada por el medio de transmisión sino por la tecnología de transmisión del haz de luz en la fibra óptica.
- Los fabricantes de fibra óptica están realizando mejoras en los cables y existen diferentes normas de cables, un ejemplo es el cable retardante de llama, para casos de chequeos o incendios. Existe también cable para ciudad norma G.652d monomodo en 1310nm y cable de larga distancia norma G.655.

2.3.3 Tecnologías de multiplexación de señales ópticas.

Una forma de incrementar capacidad es duplicar capacidad duplicando tanto equipos de transmisión como fibra óptica que las conecte, también se puede aumentar la tasa de bits sobre una misma red multiplexando las señales en una misma longitud de onda o finalmente para no duplicar equipamiento ni fibra óptica, es decir utilizar la misma infraestructura de la red de fibra óptica existente, se puede enviar diferentes señales con longitudes de onda propias y multiplexadas sobre el mismo medio para alcanzar mayores velocidades, esta última es la más eficiente como técnica de transmisión de señales ópticas.

Esta técnica de transmisión de señales ópticas es desarrollada en la década de 1980, se denominó WDM (Wavelength Division Multiplexing) o multiplexación por división de longitud de onda, que permite la transmisión simultánea de diferentes longitudes de onda (canales) por la misma fibra óptica. A principios de la década de 1990 se da la segunda generación de WDM, se denomina WDM de banda estrecha, en la cual se usaba de dos a ocho canales (longitudes de onda), que estaban espaciados 400 GHz en la ventana de 1.550 nm. A las longitudes de onda que se transmite se le denomina también *lambda coloreada*, se muestra en la figura 2.7.

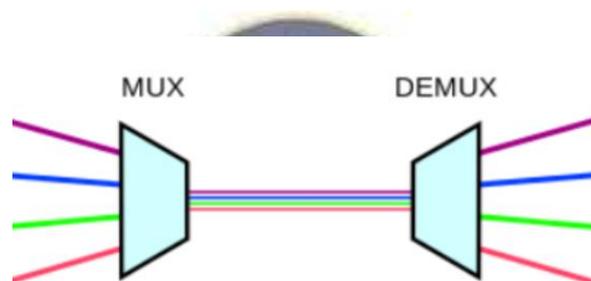


Figura 2.7–Red WDM con 4 canales.

Fuente: Medium.com “Fundamentos de la tecnología WDM” [25]

Una característica en WDM es el espaciamiento entre las diferentes λ s, la grilla tiene n longitudes de onda separadas por un espaciamiento en nm ó GHz. Por ejemplo un espaciamiento de 400GHz, significa en un caso práctico que una λ que está en una longitud de onda de 1550,12nm equivalente a una frecuencia de 193400GHz, tenga a sus canales vecinos en ± 400 GHz, el canal inmediato superior está en la frecuencia de 193800GHz equivalente a un λ de 1546,92nm y el canal inmediato inferior está en la frecuencia de 193000GHz equivalente a un λ de 1553,33nm, la conversión entre λ y frecuencia son inversamente proporcional y en el ejemplo el espaciamiento de 400GHz es equivalente a 3,28nm, espaciamiento de 20nm se usa para los canales CWDM y 0,82nm para canales DWDM.

Una tercera generación de DWDM, es hoy en día una solución que permite flexibilizar el manejo, administración y enrutamiento de las señales ópticas coloreadas, esto es posible con conmutadores de conexión cruzada de longitud de onda, longitudes de onda configurables y software de gestión avanzado para controlar la capa óptica de forma dinámica, esto es un gran avance a la tecnología DWDM desde sus inicios [50].

2.3.3.1 Multiplexación CWDM.

Los sistemas CWDM *Multiplexación por División de longitud de onda ancha o aproximada*, surgió a partir de 1980. La recomendación G.694.2 de la ITU-T del año 2002 establece las características de CWDM, espaciadas cada 20nm y llegan hasta 16λ entre 1271nm a 1611nm. El gran espaciamiento de 20nm que utiliza CWDM hace que se utilicen componentes más económicos, láseres no refrigerados y multiplexores de menor calidad. Sus características son:

- Sirve como solución con ventajas costo/efectiva para reducir latencia en redes de aplicaciones SAN (*Storage Area Network*), redes Inter-Office, central-Office (CO-CO).
- Reduce espacios en equipos de transmisión, reduciendo también el consumo eléctrico.
- CWDM se puede implementar en topologías punto a punto y anillo, en redes locales.
- Cuenta con los beneficios de una red WDM, escalabilidad y flexibilidad.

La figura 2.8 muestra la asignación de canales CWDM según la recomendación de la ITU-T.

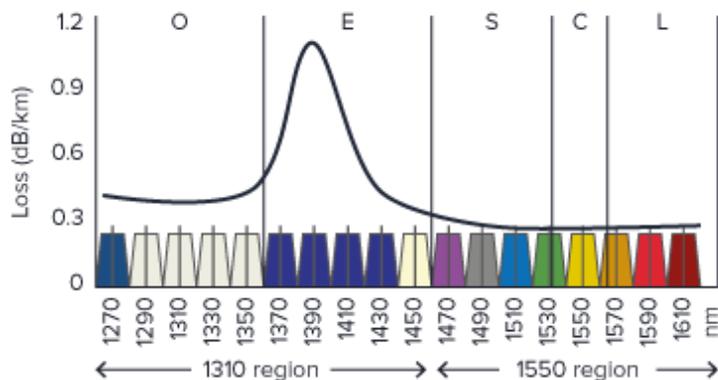


Figura 2.8–Espectro de canales CWDM según la ITU-T G.694.2

Fuente: FOCC "División de Largo de Onda Grueso y Denso Multiplexión" [26]

Los equipos CWDM, se adaptan para poder transportar diferentes tipos de tráfico de red, estos son los casos de la tecnología ATM, SDH y Gigabit Ethernet, por esta razón las tarjetas que entregan puertos clientes en CWDM, pueden estar equipadas con puertos STM1³, puertos SONET/SDH⁴, puertos Ethernet de 1Gbps hasta 10Gbps.

³ STM1, Unidad básica de transmisión en SDH 155Mbps. Módulo de transporte síncrono nivel-1.

⁴ SONET/SDH, Synchronous Optical Network. Estándar de transporte óptico para SDH.

2.3.3.2 Multiplexación DWDM.

A mediados de los noventa, los sistemas DWDM que estaban emergiendo estaban conformados por 16 a 40 canales y un espaciado de 100 a 200 GHz. Desde finales de los noventa, DWDM ha evolucionado hasta tener de 64 a 160 canales en paralelo y espaciados cada 25 o 50 GHz. En la Figura 3 se muestra un esquema de la evolución de esta tecnología. Desde el año 2010 se están implementando redes de nueva generación DWDM que soportan 640 canales reconfigurables, aplicando conceptos de MPLS⁵ y ASON (Automatically Switched Optical Network) que permiten no sólo aumentar la capacidad sino realizar ingeniería de tráfico en redes ópticas [10].

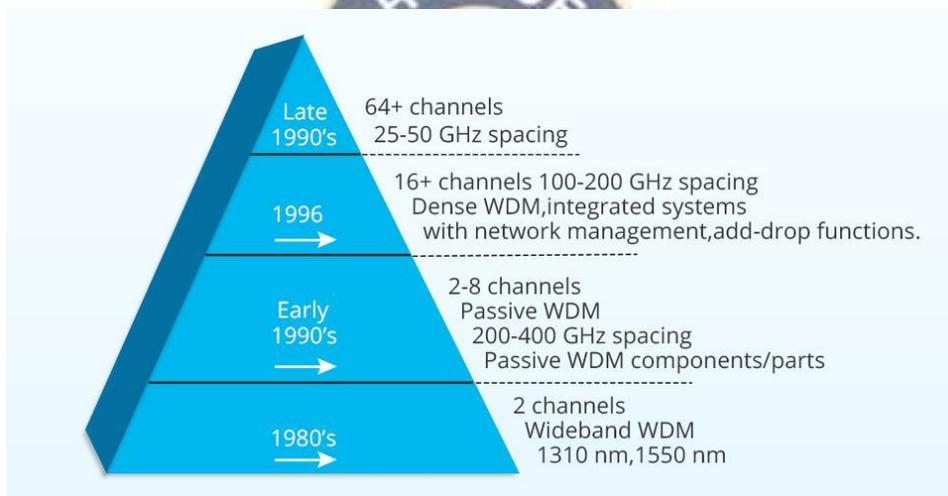


Figura 3 – Evolución de tecnologías DWDM.

Fuente: <https://www.fiberopticsshare.com/8> "Fiber Optics Network Products"

Un aspecto que diferencia CWDM y DWDM es el espaciamiento que existe entre sus portadoras, la diferencia de frecuencia nominal entre dos canales ópticos adyacentes define la capacidad final de cada tecnología, si podemos incrementar la cantidad de lambdas, entonces tendremos mayor capacidad y ancho de banda escalable en la red. Como vimos anteriormente, CWDM tiene un espaciamiento de 20nm hasta 18λ y en DWDM tenemos equipos que soportan 40, 80 hasta 160λ con un espaciamiento más estrecho de 0,8/0,4 nm o su equivalente en frecuencias de 50/100 GHz respectivamente. Esta característica hace que los transmisores requieran un mecanismo de control que les permita cumplir los requisitos de estabilidad de frecuencia de las aplicaciones, contrario a los transmisores CWDM que no lo necesitan.

⁵ MPLS, Multiprotocol Label switching. Tecnología de conmutación de etiquetas.

La multiplexación en DWDM es más densa respecto de CWDM, se tiene una cantidad mayor de canales en las mismas bandas, las longitudes de ondas DWDM y la grilla de frecuencias está normalizado por la recomendación ITU-T G.694.1. A la grilla de lambdas DWDM se conoce como plan de frecuencias y estas determinadas según la recomendación en la **Banda C** (1525-1565 nm) y la **Banda L** (1565-1620 nm). El plan de frecuencias tiene diferentes espaciamentos de canal que abarcan 12,5GHz hasta 100GHz, incluye además espaciamentos mayores múltiplos enteros de 100GHz, el espaciamento de ha subdividido a lo largos de los años por factores de dos [27].

La recomendación G.694.1 enseña las ecuaciones para el cálculo de la grilla con diferentes espaciamentos (12,5-25-50-100GHz), como ejemplo se muestra en la tabla 2, la grilla en banda C con un espaciamento de 100GHz. La banda C con espaciamento de 100GHz entre portadoras (lambdas DWDM) es uno de los más utilizados en equipos DWDM y en comparación con la grilla CWDM es notoria la granularidad de las longitudes de onda que utilizan, esto hace que los equipos DWDM sean más finos en su operación y por lo tanto más costosos. En la figura 4 se muestra la comparación de la grilla DWDM banda C espaciamento 0,8nm (100GHz) en comparación con las portadoras CWDM con espaciamento de 20nm (2500GHz).

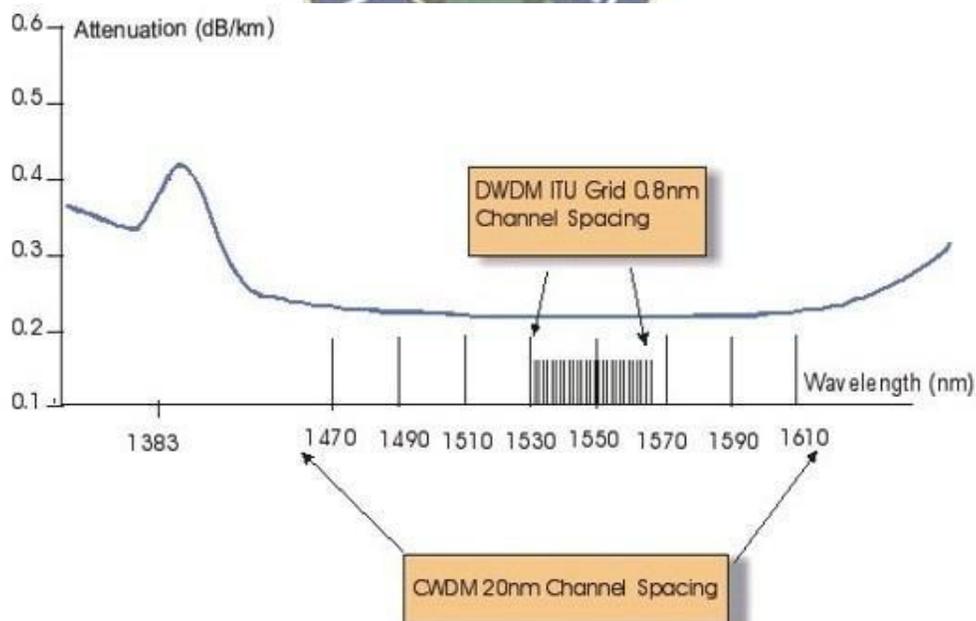


Figura 4 – Comparación del espectro en DWDM y CWDM.

Fuente: <https://blog.davantel.com/fibra-optica-cwdm-dwdm>. "Fibra Óptica – CDWM y DWDM"

Channel (#)	Frequency (GHz)	Wavelength (nm)	Channel (#)	Frequency (GHz)	Wavelength (nm)
1	190100	1577.03	37	193700	1547.72
2	190200	1576.20	38	193800	1546.92
3	190300	1575.37	39	193900	1546.12
4	190400	1574.54	40	194000	1545.32
5	190500	1573.71	41	194100	1544.53
6	190600	1572.89	42	194200	1543.73
7	190700	1572.06	43	194300	1542.94
8	190800	1571.24	44	194400	1542.14
9	190900	1570.42	45	194500	1541.35
10	191000	1569.59	46	194600	1540.56
11	191100	1568.77	47	194700	1539.77
12	191200	1567.95	48	194800	1538.98
13	191300	1567.13	49	194900	1538.19
14	191400	1566.31	50	195000	1537.40
15	191500	1565.50	51	195100	1536.61
16	191600	1564.68	52	195200	1535.82
17	191700	1563.86	53	195300	1535.04
18	191800	1563.05	54	195400	1534.25
19	191900	1562.23	55	195500	1533.47
20	192000	1561.42	56	195600	1532.68
21	192100	1560.61	57	195700	1531.90
22	192200	1559.79	58	195800	1531.12
23	192300	1558.98	59	195900	1530.33
24	192400	1558.17	60	196000	1529.55
25	192500	1557.36	61	196100	1528.77
26	192600	1556.56	62	196200	1527.99
27	192700	1555.75	63	196300	1527.22
28	192800	1554.94	64	196400	1526.44
29	192900	1554.13	65	196500	1525.66
30	193000	1553.33	66	196600	1524.89
31	193100	1552.52	67	196700	1524.11
32	193200	1551.72	68	196800	1523.34
33	193300	1550.92	69	196900	1522.56
34	193400	1550.12	70	197000	1521.79
35	193500	1549.32	71	197100	1521.02
36	193600	1548.52	72	197200	1520.25

Tabla 2 – Grilla de canales DWDM Banda C -100GHz.

Fuente: <https://www.fiberdyne.com/products/itu-grid.html> "ITU GRID"

Una portadora DWDM en Banda C que tiene espaciamento de 0,8nm dentro del espaciamento la portadora de 10GHz, utiliza 0,7nm, con una separación entre portadoras de 0,1nm, los transmisores y receptores ópticos son muy precisos para trabajar en una pequeña banda. En la figura 5 se muestra una portadora en banda C con espaciamento 0,8nm (100GHz).

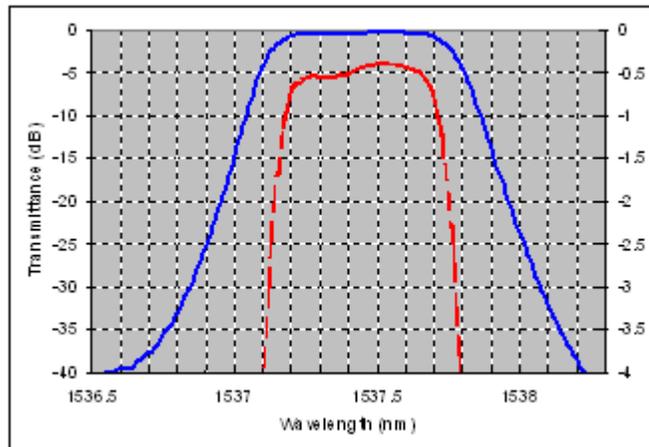


Figura 5 – Portadora DWDM espaciamento 0,8nm (100GHz) .

Fuente: http://www.lightwaves2020.com/productinfo_word.php?prono=30. "DWDM Filters"

2.3.4 Componentes de una red DWDM.

El sistema DWDM tiene diferentes componentes electrónicos y optoelectrónicas que lo componen a nivel físico. En la Figura 6 se muestra el esquema de un enlace DWDM.

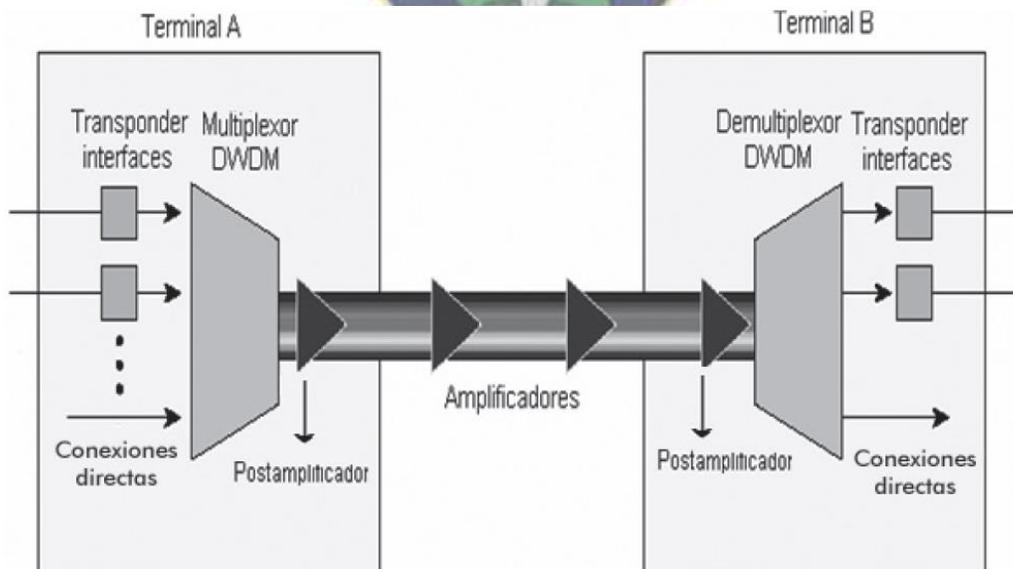


Figura 6 – Componentes y sub-sistemas de una red DWDM.

Fuente: Revista Visión Electrónica. "Redes Ópticas DWDM"

A nivel de componentes electrónicos y optoelectrónicos podemos resumir que un enlace DWDM está compuesto por tres equipos principalmente:

- Transponders **OTU**: Se encarga de unir las señales ópticas no coloreadas en una señal coloreada. Los puertos clientes son SDH/SONET/Gigabit Ethernet.
- Multiplexores **OMU**: Multiplexan varias longitudes de onda coloreadas, del espectro DWDM y se pueda unir en una sola señal óptica de salida.
- Amplificadores **OA**: Los amplificadores se encargan de dar una ganancia específica para poder cumplir con el presupuesto de potencia para el enlace DWDM.

A nivel de una arquitectura de componentes DWDM se puede realizar una clasificación en diagrama de bloques, compuestos principalmente por los elementos descritos anteriormente, los principales componentes se muestran en la figura siguiente.

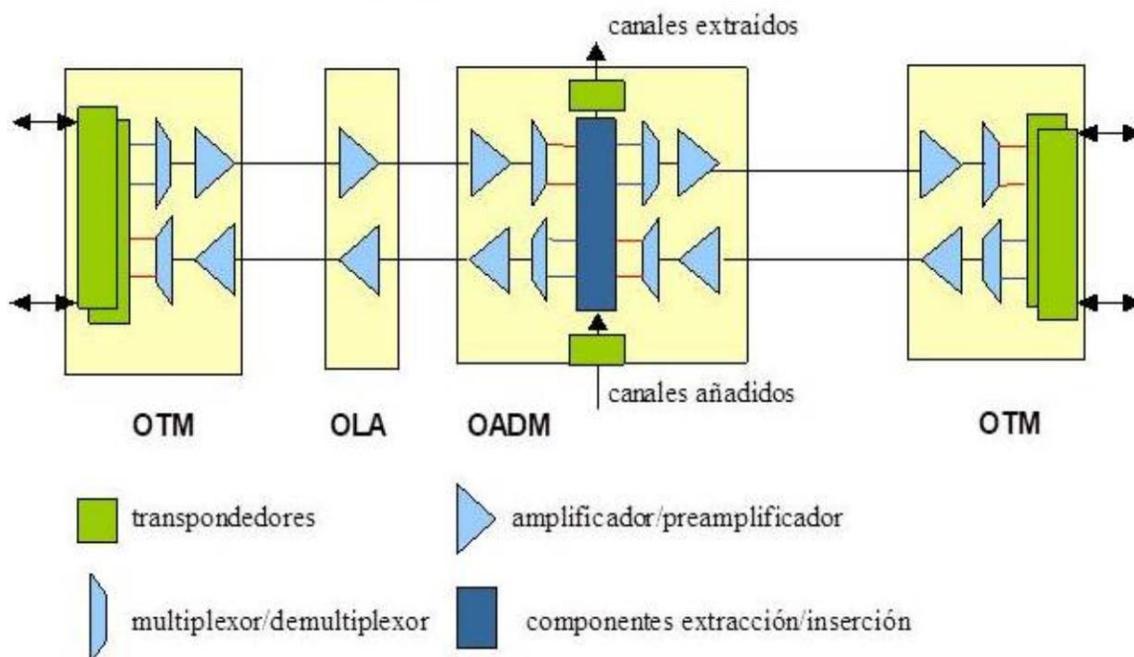


Figura 6.1 – Arquitectura de Redes DWDM.

Fuente: <https://www.ramonmillan.com/tutoriales/dwdmlargadistancia.php>. "DWDM corrige limitaciones de la Fibra"

Los componentes principales son:

- **OTM** (*Optical Terminal Multiplexer*). Tiene la responsabilidad de multiplexar y demultiplexar desde la recepción de señales de cliente hasta la transmisión de las señales DWDM compuesta por todas las señales coloreadas.
- **OLA** (*Optical Line Amplifier*). Tiene la responsabilidad de amplificar las señales DWDM mutiplexadas, su objetivo es regenerar la señal óptica para poder llegar a la distancia para cual fue diseñada.
- **OADM** (*Optical Add&Drop Multiplexer*). Tiene responsabilidad de extraer/insertar información de un determinado canal óptico, el procesamiento se realiza a nivel óptico completamente sobre una lambda coloreada. En la actualidad también existen multiplexores ROADM donde R significa reconfigurable de forma remota y mediante software, lo cual añade un grado alto flexibilidad para la reconfiguración de redes DWDM.

2.3.5 Diseño de redes ópticas DWDM.

El diseño de una red DWDM implica obtener el equilibrio entre la capacidad requerida y la capacidad diseñada, gastos equilibrados CAPEX y un bajo costo de OPEX. Se debe comenzar identificando los requerimientos iniciales y el objetivo para el cual se necesita una red DWDM en vez de una red CWDM, Red MetroEthernet, enlaces SONET/SDH.

Entre los principales parámetros a considerar están:

- **Escalabilidad:** Define la cantidad de lambdas requeridos y la cantidad inmediata lambdas adicionales, que permitirán a futuro soportar ampliaciones.
- **Disponibilidad:** Define el grado de disponibilidad de la red, un ejemplo puede ser una red muy confiable con una disponibilidad de 99,999% o por otro lado una confiabilidad menor de 98,999% puede aceptarse a costa de una reducción de costos en el proyecto.
- **Capacidad:** Define tanto la capacidad a nivel de puertos de cliente, como la cantidad de lambdas que soporte la red DWDM, por ejemplo, una capacidad de 10x10Gigabit sobre una sola portadora de 100Gbps (lambda coloreada en el espectro óptico DWDM).

- **Costos CAPEX/OPEX:** Los costos asociados a un diseño e implementación, se definen enmarcados al presupuesto disponible.
- **Instalación y cronograma:** En función del presupuesto disponible y el requerimiento de capacidad, cantidad de nodos, red de fibra óptica, se define el cronograma.
- **Medio de Transmisión:** Define si se requiere la implementación de fibra óptica entre nodos, si son enlaces de fibra óptica nueva o utilizaran red existente.
- **Gestión de la Red:** Define la necesidad de contar con un sistema de gestión centralizado o puede ser gestionado desde uno de los nodos principales de la red.
- **Topología de la Red:** Define la cantidad de nodos y la topología requerida según el requerimiento de disponibilidad, prevé aspectos de redundancia y convergencia de la red ante fallos en el medio físico o tarjetas de los equipos.

Para el diseño de la red DWDM debemos tomar en cuentas los siguientes alcances:

- a) Diseño a nivel de potencia óptica.
- b) Diseño a nivel de ancho de banda.
- c) Diseño a nivel de ruido.
- d) Planeación de equipos, tarjetas y topología.
- e) Planeación de la red de fibra óptica.

2.3.5.1 Diseño y cálculo de presupuesto de potencia óptica.

Cuando la señal sale del amplificador en un nodo OTM a medida que viaja por la fibra óptica decrece exponencialmente. Aunque el cálculo de potencia óptica depende de la distancia de la fibra óptica (dispersión, efectos no lineales de fibra óptica), la atenuación de los conectores, también dependen de la potencia óptica proporcionada por el láser emisor (conversión optoelectrónica) y la potencia de salida del post-amplificador (amplificación óptica) en el nodo OTM.

Las pérdidas de los enlaces de fibra óptica, están considerados todos los tipos de pérdidas intrínsecas como el coeficiente de atenuación, pérdidas extrínsecas y atenuación de conectores físicos. Debemos considerar los siguientes 2 aspectos principalmente:

- **Presupuesto de Potencia óptica:** Es el presupuesto que hace referencia a la tolerancia de la pérdida de potencia óptica entre transmisión y sensibilidad de recepción, estos valores delimitan un rango de valores, con un valor máximo y mínimo de trabajo.
- **Presupuesto de Pérdida óptica:** El análisis de este presupuesto se realiza mediante el cálculo y verificación de todas las características que influyen y aportan en la degradación de la señal óptica, atenuación interna, externa. El resultado es un cálculo de pérdida acumulada de extremo a extremo.

Cálculo de presupuesto de pérdida Óptica:

El cálculo de presupuesto de pérdida óptica se realiza tomando en cuenta:

1) Cálculo de Pérdida Total por medio Físico:

- Pérdida en la fibra óptica (PFO): Se calcula con los datos del coeficiente de atenuación de la fibra y la distancia del enlace de fibra. Es la atenuación natural de la luz:

$$PFO (dB) = Distancia (km) \times Coef. Atenuación \left(\frac{dB}{km}\right) \quad (2.1)$$

- Pérdida por conectores (PCO): Se calcula con los datos de pérdida de conector y la cantidad de conectores:

$$PCO (dB) = Cant. Conectores \times Perdida Conector (dB) \quad (2.2)$$

- Pérdida por muflas de empalme (PME): Se calcula con los datos de pérdida por empalme y cantidad empalmes en el enlace de fibra óptica:

$$PME (dB) = Cant. Muflas \times Perdida Empalme (dB) \quad (2.3)$$

La pérdida de medio físico total es la suma de las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3:

$$Pérdida Medio Físico (dB) = PFO + PCO + PME \quad (2.4)$$

2) Cálculo de Margen de Pérdida de la señal óptica:

- Potencia de Recepción (Prx): Posterior a que la señal es enviada por el transmisor con una potencia de salida (Ptx) y viaja por la fibra óptica, llega con un nivel potencia atenuado, la potencia de la señal de recepción es:

$$P_{rx} (dBm) = P_{tx} (dBm) - Pérdida Medio Físico \quad (2.5)$$

El Margen de Pérdida (MP): Es la diferencia entre el nivel de recepción (P_{rx}) en dB respecto a la potencia de sensibilidad del receptor (P_{senrx}) como se muestra en la figura 6.2:

$$MP (dBm) = P_{rx} (dBm) - P_{senrx} (dBm) \quad (2.6)$$

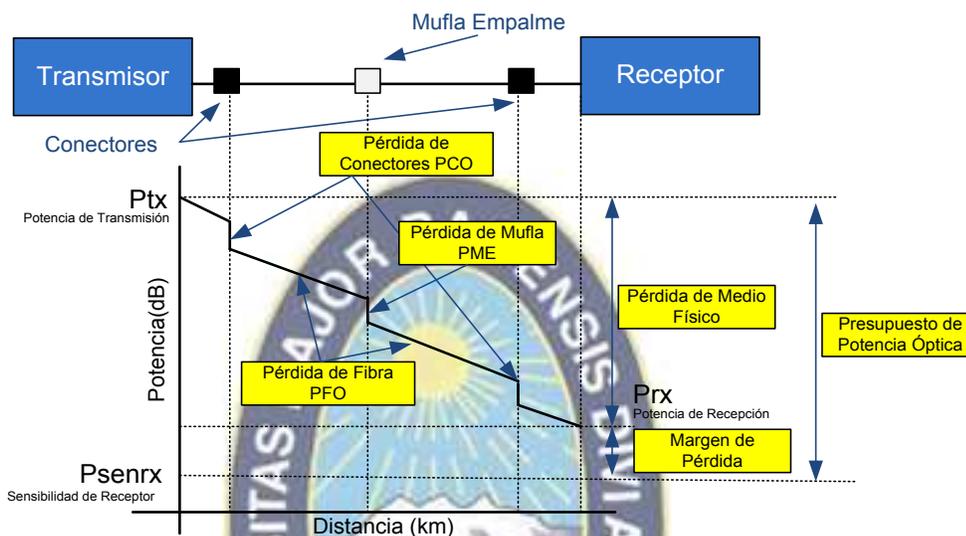


Figura 6.2 – Pérdidas en señales ópticas.

Fuente: Elaboración Propia.

El presupuesto de pérdida óptica, asegura que el nivel de recepción de la señal siempre sea mayor al nivel de sensibilidad del receptor mínimamente por encima de 3dB:

$$\text{Presupuesto Pérdida Óptica (dBm)} \geq MP (dBm) + 3 (dB) \quad (2.7)$$

El presupuesto de Potencia óptica (PPO), se puede calcular a partir del rango dinámico que se tiene en el receptor y en función de la potencia mínima que puede emitir el transmisor:

$$\text{Presupuesto Potencia Óptica (dB)} = P_{min_{tx}} (dBm) - P_{sen_{rx}} (dBm) \quad (2.8)$$

El presupuesto óptico del diseño está directamente relacionado al rango dinámico que indica la capacidad a la cual un receptor aún puede reconocer las señales que le llegan. Se debe realizar un diseño para que el margen de pérdida (MP) no sea menor ni mayor que PPO:

- $MP > PPO$ significa que el enlace está saturado y puede llegar a dañar equipos. Podría significar que los equipos no están emparejados y son diferentes.
- $MP < PPO$ significa que el enlace está muy degradado o tiene fallas en transmisión. No está llegando la suficiente potencia de señal hacia el receptor.

2.3.5.2 Capacidad de ancho de banda DWDM.

Las capacidades existentes o disponibles actualmente son las siguientes:

- **A nivel de Transponder** existen tarjetas que soportan puertos Gigabit Ethernet de capacidades de 1GBps hasta 100Gbps, STM1 de 155Mbps, SONET/SDH hasta 10Gbps.
- **A nivel de Multiplexor** se puede aumentar más aún la capacidad de ancho de banda, se puede hablar de capacidades de multiplexación desde 16λ hasta 240λ coloreadas.

Para dimensionar la capacidad total de la red DWDM, partimos del requerimiento total de ancho de banda, que tenemos proyectados llevar sobre la red, las señales a nivel de clientes están estandarizadas en tres tipos principalmente:

- Gigabit Ethernet: Las capacidades en Ethernet esta normalizadas por la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), son las siguientes:
 - 802.3z – 100GBASE-X Ethernet de 1 Gbit/s sobre fibra óptica.
 - 802.3ae – Ethernet a 10 Gbit/s; 10GBASE-SR, 10GBASE-LR.
 - 802.3bm – 100G/40G Ethernet para fibra óptica.
- SONET/SDH: Las capacidades en SONET (Synchronous Optical Network) está definido por sus portadoras ópticas (OC–Optical Carrier) y las utilizadas en DWDM son:

Portadora SONET	Velocidad (Mbps)	Equivalente SDH
OC-3	155,52	STM-1
OC-12	622,08	STM-4
OC-192	9953,28	STM-64
OC-768	39813,12	STM-256

Tabla 3 – Capacidades SONET/SDH.

Fuente: Elaboración propia.

- Fibre Channel (FC): Aunque no es muy utilizado, FC está destinado para la conexión de transporte en redes SAN (*Storage Area Network*) de almacenamiento, utiliza velocidades de 1, 2, 4, 8, 16 y 128 Gbps. Se apoya en SFP para su conversión optoelectrónica.

La capacidad total mínima requerida es la suma de todo el tráfico generado de lado cliente, diferenciando los tipos de señales y capacidades que demandan.

2.3.5.3 Diseño a nivel de ruido óptico.

En el diseño de redes ópticas DWDM, se deben evaluar los niveles de señal a ruido que son aceptables para la red, el concepto de SNR (signal-to-noise ratio) o figura de señal a ruido es la proporción entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido existente. Para redes ópticas esta relación se conoce como OSNR (optical signal-to-noise ratio) y se mide en decibelios dB. El valor del OSNR es un reflejo de la calidad de señal óptica y es medible. El cálculo de OSNR se obtiene en función de la potencia de la señal P_s y la potencia del ruido P_n :

$$OSNR \text{ (dB)} = 10 \log \log \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (3.1)$$

El valor para el cual se debe diseñar la red debe buscar mantener un margen de OSNR mayor a 15dB, aunque depende de factores como la tolerancia a los errores y los tipos de transmisores, trabajar fuera del margen OSNR hace que el nivel de bits errados (BER Bit Error Rate) aumente considerablemente, tasas arriba de 10^{12} son aceptables para redes DWDM de larga distancia.

La potencia de la señal de ruido, aunque no puede controlarse de forma directa, se debe considerar en la etapa de diseño para el cálculo de $OSNR > 15\text{dB}$, aunque este valor es una referencia el cálculo también depende de la calidad de señal óptica de los transmisores y de la velocidad del enlace óptico, por ejemplo, un enlace de 10Gbps requiere menor valor de OSNR en comparación con un enlace de 100Gbps.

2.3.5.4 Planeación de topología, equipos y tarjetas.

La definición de la topología dentro del diseño de una red DWDM, depende directamente del tipo de aplicación final y los servicios que se requieren brindar, así también de los puntos donde se necesita extraer/insertar tráfico. Los escenarios son los siguientes:

- Enlaces Punto a Punto: Estos enlaces se utilizan para enlaces de larga distancia o ultra larga distancia, distancias mayores a los 100km, puede requerir nodos OLA.
- Topología Anillo: No existen nodos iniciales ni finales y brinda redundancia, se compone principalmente por nodos OADM, nodos OTM y nodos OLA.

- Topología Red Mixta: Es la topología más completa, brinda una flexibilidad al diseño de redes, puede unir varias redes en anillo con redes punto a punto y con redes tipo árbol.

En la siguiente figura se muestran las topologías descritas:

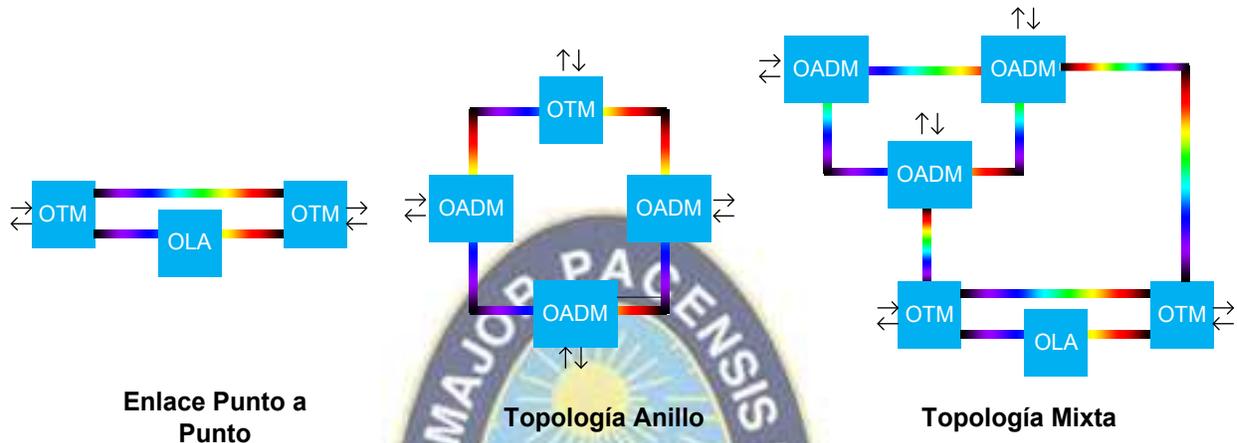


Figura 6.3 – Topologías de Red DWDM.

Fuente: Elaboración Propia.

Para el dimensionamiento de equipos dentro del diseño de la red DWDM, los fabricantes utilizan programas de planeación propietarios. Los principales inputs son los siguientes:

- Cantidad de nodos, capacidad de puertos cliente y ancho de banda requerido.
- Distancia de la fibra óptica, tipo de fibra óptica, mediciones de atenuación de la fibra óptica.
- Topología de la red o definición de nodos terminales y nodos OADM.

El resultado es una lista de materiales BOM (Bill of materials) y los scrips de configuración, para mencionar dos casos específicos de estas herramientas de fabricantes, podemos indicar:

- Cisco Transport Planner: Herramienta de diseño de redes ópticas que permite dimensionar lambdas, layout del rack de equipos, equipos y cableado requerido, sus resultados son materiales BOM, reporte de performance, conexiones ópticas y configuraciones [28].
- Planner Plus: Herramienta del fabricante CIENA que brinda los resultados de planeación igual que la herramienta de CISCO, ambos cumplen el propósito de diseñar equipos, cableado, configuraciones y materiales [29].

2.3.5.5 Planeación de la red de Fibra Óptica.

El diseño y planeación de la red de fibra óptica como parte del diseño de una red DWDM, tiene un gran impacto en el éxito del objetivo de implementar una red DWDM. Esto es debido que las redes de fibra óptica representan uno de los mayores costos para redes de larga distancia, adicionalmente los tiempos de implementación son muy largos en redes de más de 100km, se debe considerar que la construcción de un enlace de fibra óptica requiere de gran cantidad de material, ferretería de sujeción, plantación de postes, permisos de uso de derecho de vía en la red vial, permisos de alcaldías y permiso para uso de postes de empresas eléctricas en áreas urbanas y suburbanas. Los inputs que se requieren para el diseño son:

- Cantidad y ubicación de nodos de fibra óptica.
- Topología de la red.
- Distancia en km entre nodos.
- Cantidad de hilos de fibra óptica.

Con estos inputs se realiza el diseño de la red de fibra óptica primeramente estableciendo los caminos o rutas para la fibra óptica en planta externa (aéreos y subterráneos), se realiza una visita al trazado para confirmar el camino de la fibra óptica y su viabilidad, ya que la ruta diseñada en herramientas como AutoCad o google maps, puede tener tramos que no pueden conectarse por motivos del terreno u obstáculos.

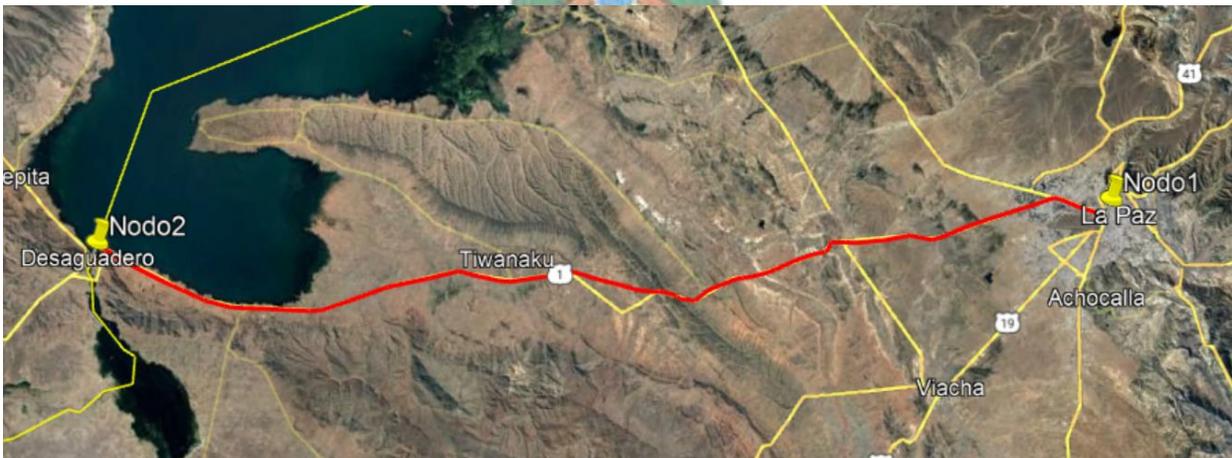


Figura 6.4 – Enlace de Fibra Óptica.

Fuente: Elaboración Propia en Google Earth.

En la figura anterior se muestra un ejemplo del diseño de una ruta de fibra óptica entre La Paz y Desaguadero, en la cual la distancia total del enlace es aproximadamente 100km. Una vez que la ruta o rutas totales se hayan confirmado que es posible de construir, se debe realizar la cuantificación de materiales requeridos:

- Ferretería para el tendido de fibra óptica [30].
- Tipo y cantidad de Cable de fibra óptica [31].
- Postes para sujeción del cable de fibra.
- Tipo de cantidad de Muflas de empalme [32].

Paralelamente a la compra de materiales (el costo es directamente proporcional a la distancia en km), se debe realizar la gestión de todos los permisos de construcción (municipales, empresas eléctricas, terceros) que puede demorar muchos meses.

Con los permisos otorgados, se debe realizar la construcción de elementos de apoyo y sujeción; plantado de postes (tendido aéreo), construcción de cámaras y canalización (tendido subterráneo), construcción de ingreso a nodos terminales.

Cuando ya se cuenta con materiales y los apoyos, se puede iniciar el tendido de cable de fibra óptica, instalando ferretería y muflas de empalme. El trabajo se termina con la certificación del enlace de fibra óptica hilos por hilo para validar que no tenga atenuación por falla en las fusiones y no tenga atenuaciones por estrés del cable.

Ahora bien, la construcción de un enlace de fibra óptica puede llevar mucho tiempo y costo en directa relación a la cantidad de enlaces requeridos y la cantidad total de fibra óptica en la ruta o rutas. Por ejemplo, en Bolivia un enlace de fibra óptica de 24hilos de 100km puede llegar a costar más de 250k USD y el tiempo de implementación desde el diseño hasta las pruebas de certificación puede llegar a durar de 3 a 6 meses en terreno llano y de 6 meses a 1 año en terreno tupido con vegetación abundante.

Lo anterior realmente impacta en costos y tiempo al diseño e implementación de una red DWDM nueva que requiere enlaces de fibra óptica para su conexión.



3. CAPA FOTÓNICA DWDM

Como se mostró en la figura 6, un componente principal de un enlace DWDM es la capa de transporte óptico formada entre los transponders y multiplexores, estos dos componentes administran las longitudes de onda DWDM o como son llamadas lambdas coloreadas.

3.1 Transmisión óptica.

A nivel DWDM el tema relacionado a la transmisión óptica es un tema especial debido a la tecnología requerida y el avance que ha tenido desde sus inicios, los límites de velocidad y capacidad no son restringidos por la fibra óptica como medio de transmisión, sino por las técnicas de modulación en los emisores y detectores de señal óptica. A nivel de transmisión óptica DWDM existen disturbios que se presentan por encima de los 10Gbps, principalmente existen 2 tipos de disturbios que son resultado de los fenómenos relacionados a la velocidad de respuesta del núcleo de fibra óptica a los niveles de impulso o energía de la luz.

Estos 2 tipos de efectos en las tramas transmitidas (λ coloreadas) son:

- Disminución de amplitud de la señal. Principalmente a la degradación intrínseca y extrínseca de la fibra óptica.
- Distorsión de los pulsos. A medida que la señal óptica viaja en la fibra óptica, se va conformando una distorsión del pulso que ensancha y desfasa a la señal original.

Para la solución de las distorsiones, existen los compensadores de dispersión cromática [33] y el compensador de dispersión por modo de polarización [34].

3.1.2 Modulación DWDM.

Las portadoras DWDM tienen el espectro muy fino y hace que los requerimientos a nivel ópticos del láser sean más precisos alrededor de los 10pm (picómetros) para brindar una estabilidad a largo plazo en la longitud de onda de trabajo. Por esta razón las características de modulación que se deben utilizar son también definidas en función de las capacidades de

transmisión en Mbps y el espaciamiento en la grilla del plan de frecuencias, adicionalmente es importante explicar sobre la fotónica coherente en redes DWDM.

La óptica coherente ayuda a mejorar el rendimiento y flexibilidad para transportar mayor información y capacidad en comparación con la modulación tradicional de unos y ceros en una señal digital denominada OOK (On-Off Keying) o NRZ (no retorno a cero).

Aunque la tecnología es sofisticada para modulación coherente ya que tiene que modular amplitud y fase en la portadora DWDM, además de enviar la señal en dos polarizaciones, los beneficios son considerables para lograr gran velocidad en redes DWDM.

Los fabricantes en los últimos años han mejorado la óptica coherente para ganar mayor eficiencia espectral y velocidad de transmisión a un menor costo por bit.

En la tabla 4 se muestran las diferentes técnicas de modulación utilizadas en redes ópticas, para el caso de redes ópticas coherentes que son utilizadas actualmente en redes DWDM se utiliza modulación basada en PSK⁶ y QAM⁷.

Técnica de Detección	Técnica de Modulación	Clase de Técnica
No Coherente	PAM (Modulación por Amplitud de Pulsos)	Asíncrona
Coherente diferencial	DPSK (Modulación Diferencial Desplazamiento de Fase)	
Coherente	PSK, QAM	Síncrona

Tabla 4 – Clasificación de tipos de Modulación por tipo de Técnica de detección.

Fuente: Elaboración Propia.

Hasta la fecha uno de los campos de investigación científica es la búsqueda de incrementar la eficiencia espectral para aumentar la capacidad en Mbps que se puede llegar a modular sobre la fibra óptica, además también considerando que deben llegar a altas velocidades y largas o ultra largas distancias.

⁶ PSK, Phase Shift Keying. Codificación por cambio de fase.

⁷ QAM, Quadrature amplitude modulation. Modulación por amplitud de cuadratura.

Como se mencionó anteriormente, los retos de la modulación es vencer las no linealidades de la fibra óptica, brindando en el otro extremo la facilidad para la detección de la señal con el menor BER posible. Aunque en las investigaciones, se realizaron diseños sobre la modulación de la luz, que empezó en un sencillo encendido y apagado, se siguen realizando pruebas de la modulación y simulaciones del comportamiento de la modulación, para estudiar la mejora de eficiencia espectral y velocidad.

Una técnica de modulación que es usada actualmente para llegar a velocidades de 100Gbps en una portadora DWDM está basada en PSK y se denomina DP-PSK, es una modulación de doble polarización en PSK.

Como ejemplo de uso de DP-PSK y su gran eficiencia espectral DWDM, puede llegar a propagar una velocidad de 127Gbps en una grilla con espaciamento de 50GHz en multiplexores ópticos reconfigurables, se verá más adelante este tipo de multiplexores.

Por otro lado, también para sistemas 400Gbps se utilizan portadora dual con modulación PDM-16QAM (Polarization Division Multiplexing), donde cada portadora aporta 200Gbps en una portadora con espaciamento de 50GHz, la eficiencia alcanzada es de 4Bits/s/Hz y una tasa de símbolos de 43.4Gbaudios.

Recordemos que los baudios hacen referencia al número de símbolos por segundo en un medio de transmisión digital y cada símbolo puede comprender 1 o más bits, dependiendo del esquema de modulación.

En los últimos años también se ha demostrado que una técnica combinada de modulación puede llegar a ser eficiente, esta técnica está basado en PSK conformada de 4 fases diferenciadas, DQPSK (Optical Differential Quadrature Phase Shift Keying), varios estudios demuestran que esta técnica puede llegar a comportarse de una manera eficiente [35].

3.2 Arquitectura de redes ópticas OTN

En los últimos años, el crecimiento y uso de los fundamentos técnicos de la arquitectura OTN (Optical Transport Network) ha aumentado en la implementación de diferentes redes DWDM. OTN permite aumentar el rendimiento de DWDM, reducir la latencia, mejorar la administración de la red, OTN está descrito en el estándar G.709 de la ITU. Aunque OTN se orienta también al tráfico SONET/SDH, principalmente está orientado a tráfico ETHERNET, para el cual los estándares se alinean completamente. OTN es la única tecnología óptica que está orientada a encapsular cargas útiles de alta capacidad. En la actualidad DWDM está basado en OTN y es el único protocolo capaz de transportar por encima de los 40Gbps.

3.2.1 Jerarquía OTH y estructura de trama OTN.

En la figura 7 se muestra las capas de la jerarquía OTH, conformado en la capa óptica por la sección de transmisión, multiplexación y canales ópticos.

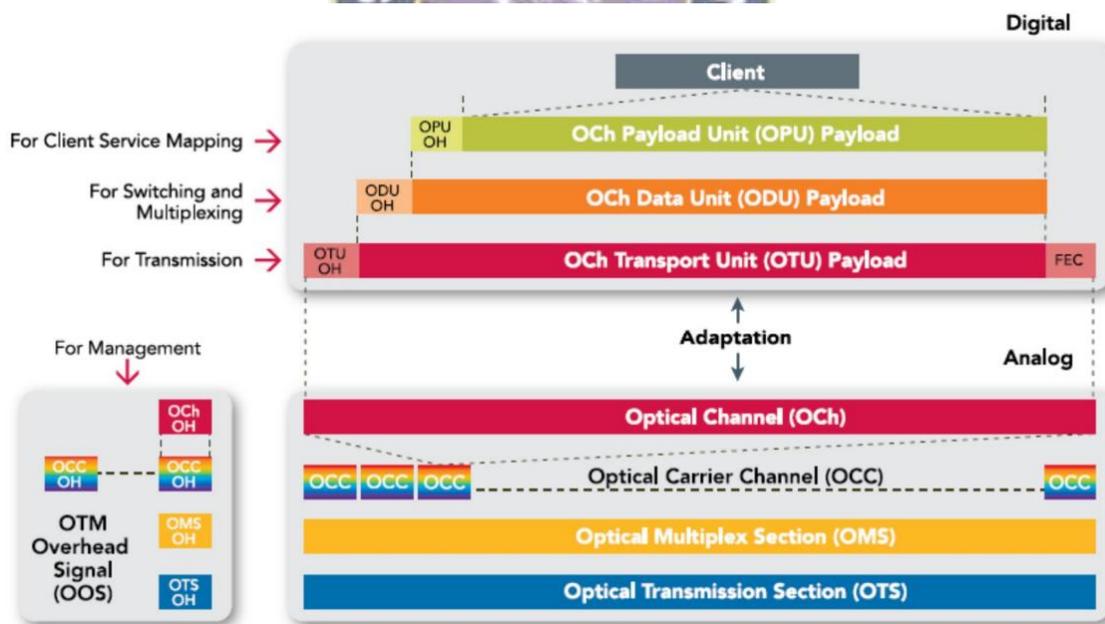


Figura 7 – Jerarquía Óptica OTH.

Fuente: "Study Paper on Evolution of High Capacity Optical Transport Network" [36]

La capa electrónica en la figura 7 son las encargadas de llevar las señales de cliente (lambda no coloreada) hasta señales ópticas DWDM, el tráfico de cliente que puede procesarse no depende

de OTN sino de la red que se requiere transportar, entre ellos están IP/Ethernet (1,10,100 GBps), SONET/SDH (hasta 40Gbps), Fibre Channel. Las capas ODU (*Optical Data Unit*) y OPU (*Optical Payload Unit*) se encargan de la capa de cliente y la adaptación de las señales de cliente a las tramas OTN. La sección de transmisión OTS (*optical transmission Section*) gestiona los segmentos ópticos entre los componentes como los amplificadores y multiplexores, la capa de multiplexación OMS gestiona el enlace entre multiplexores y conmutadores, la capa OCh gestiona conexiones ópticas entre regeneradores 3R⁸.

En la figura siguiente se puede ver la representación de los segmentos de la clasificación OTH en la estructura de línea de componentes de una red DWDM, en realidad se trata de la delimitación a nivel de elementos de DWDM dentro de OTN.

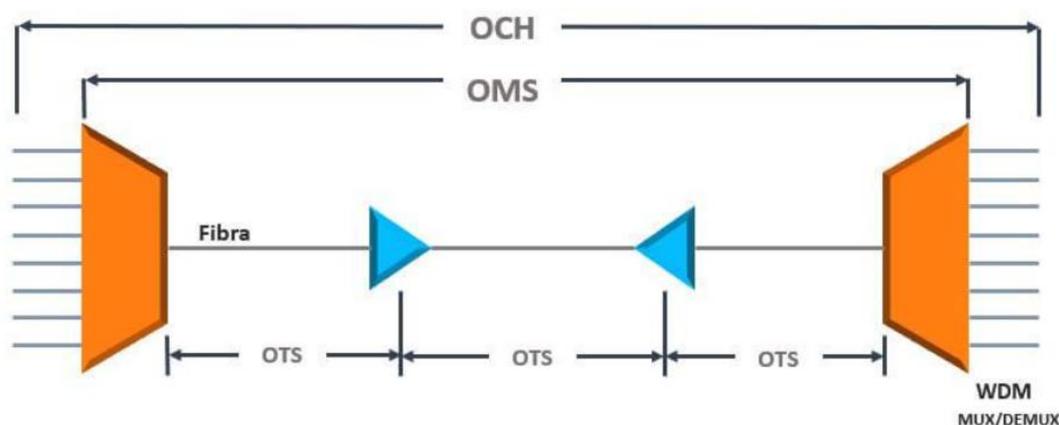


Figura 7.1 – Estructura de Línea OTN.

Fuente: <https://sisutelco.com/tecnologias-de-transporte/> "Tecnologías de transporte de información PDH/ SDH/ FIBRE CHANNEL/ OTN"

A nivel de sincronismo OTN es completamente asíncrona a diferencia de SONET/SDH que requiere una distribución de la temporización, que en la práctica es costosa por requerir una alta precisión. OTN para asegurar la confiabilidad de los datos utiliza un ajuste de temporización por tipo de servicio, de esta forma puede transportar servicios asíncronos (Gigabit Ethernet) como servicios que requiere sincronismo (STM1, OC-3), entregando como resultado una longitud de onda multiplexada común.

⁸ 3R, Regenerator/Reshaper/Retimer. Regeneración/Recuperación/Resincronización.

La **estructura de una trama DWDM** según la jerarquía OTN (Optical transport Network), está definida por el estándar G.709 y tiene 3 áreas principales:

- OPuk es el área definida para la carga útil (*payload*).
- ODUk contiene el OPuk con Bytes de overhead adicionales.
- OTUk es la sección de entramado.

La portadora DWDM está conformada por canales que contienen las señales digitales de cliente, este se denomina OTUk. El OTUk es la señal digital de la longitud de onda, adicionalmente incluye el overhead del OTUk para el canal óptico del canal de unidad de datos (ODU, optical data unit) en el nivel K determinado (ODUK) y el bloque para detección y chequeo de errores (FEC).

La trama OTUk consiste de 4 filas de 4080 Bytes, independientemente del nivel de K. Cada ODUk contiene una unidad de carga útil de canal óptico (Optical Channel Payload unit) (OPUk), el cual lleva uno o más ODUks, en la figura 8 se muestra la estructura de una trama OTN. Una trama se transmite en serie comenzando por la fila 1 de izquierda a derecha, cada fila está compuesta por 16 bloques FEC entrelazados de 255bytes que son un total de $16 \times 255 = 4080$ bytes, cada byte tiene 1 byte de encabezado, 238 bytes de carga útil y 16 bytes de FEC redundantes. Siendo que se intercalan 16 bloques y cada bloque puedes corregir hasta 9 bytes de errores, las ráfagas de errores se pueden corregir hasta $16 \times 8 = 128$ bytes, los encabezados OTU y ODU residen en las columnas 1 al 14 de la trama y la sobrecarga OTU está en la fila 1, ODU en las filas 2 al 4, encabezado OPU está en las columnas 15 y 16.

Una ventaja muy importante de OTN es el soporte corrección de errores FEC en la trama OTU, esta corrección está estandarizada en la recomendación G.975 de la ITU, es agregado en la última sección de la trama OTN antes de codificarse para la transmisión. En la práctica FEC es muy eficiente para corregir errores y grandes errores que pueden llegar a presentarse producto de efectos optoelectrónicos, degradación a nivel de fibra óptica, FEC permite que los enlaces DWDM puedan ser de extensos sin necesidad de amplificadores, reduciendo costos y maximizando el beneficio de una red DWDM.

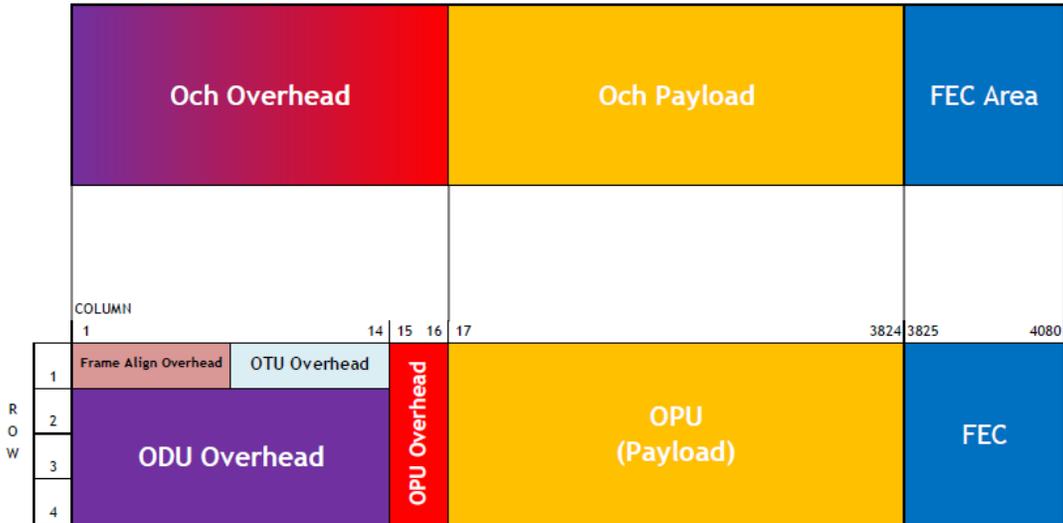


Figura 8 – Estructura de trama OTN en DWDM.

Fuente: Recomendación ITU-T G.694.1

3.2.2 Velocidad de bits tramas OTN.

Dentro de la jerarquía óptica, la velocidad de la señal OTU se optimiza para el manejo de distintos tipos de tráfico, en la tabla siguiente se muestra la relación de velocidad y aplicación, incluyendo la señal OTUC4 de 400Gbps añadida para su uso en 2021.

Señal	Velocidad de transmisión de datos aprox. (Gbps)	Aplicación
OTU1	2,66	SONET OC-48 / SDH STM-16
OTU2	10,7	10G /SONET OC-192 / SDH STM-64
OTU2e	11,09	10GbitEth Velocidad Max. Línea 10,3Gbps
OTU3	43,01	40G / SONET OC-768 /SDH STM-256
OTU3e2	44,58	Agrupación hasta 4 x OTU2e
OTU4/ODU4	112	100 G
OTUC4	448	400 G

Tabla 5 – Velocidad de Línea de señales OTUk.

Fuente: Elaboración Propia basado en la recomendación G.709.

La flexibilidad de OTN permite mapear diferentes tipos de tráfico en contenedores mayores dentro de la jerarquía OTH, muy similar a la conocida jerarquía SDH, permitiendo agrupación de señales ODUk en señales OTUk para optimizar el uso de la capacidad. Los contenedores OTU son el paso intermedio para la conversión optoelectrónica y la conversión en longitudes

de onda DWDM. Estos contenedores reciben todo el entramado de la carga útil del cliente y los overheads, cabeceras o taras de cada jerarquía, hasta los bloques de FEC.

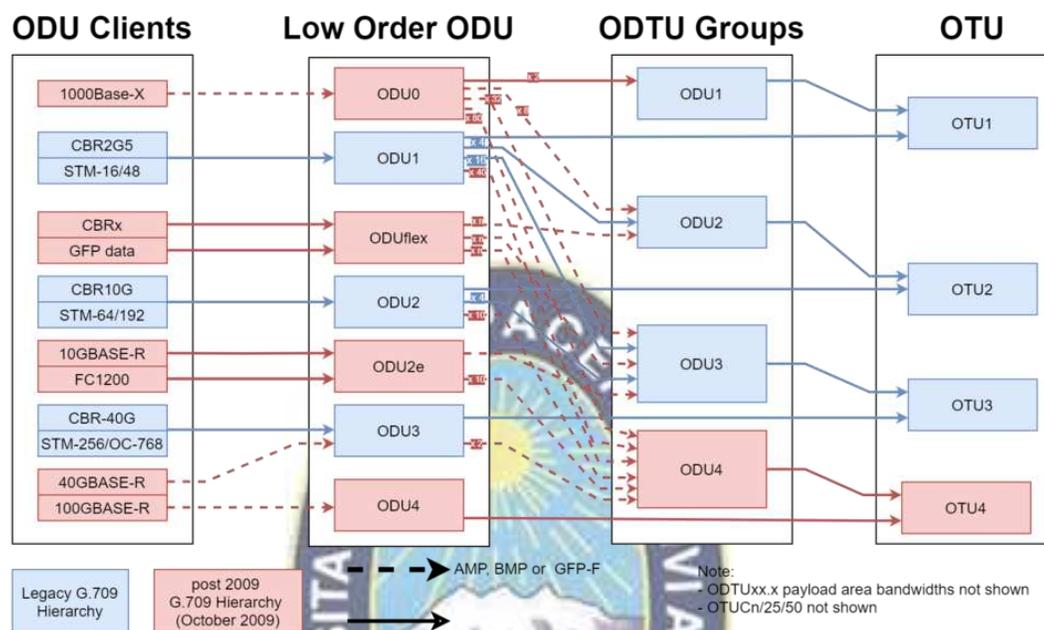


Figura 8.1 – Estructura de multiplexación OTN.

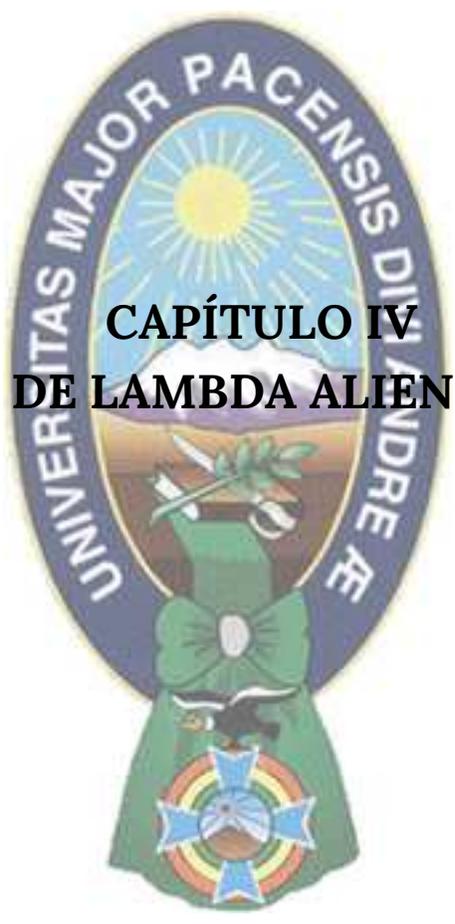
Fuente: Wikipedia "Optical Transport Network"

En la tabla 6 se muestra la cantidad de señales máximo ODUk, esta propiedad de OTN permite multiplexar varias señales en contenedores de nivel superior de ODUk. OTN permite asignación de bajo orden y alto orden, las señales de bajo orden se utilizan cuando a nivel del cliente no se necesita más agregación y las señales de alto orden se utilizan cuando se necesita de agregación y multiplexación de sub-longitudes de onda.

Señal	Velocidad Nominal (Gbit/s)	Nro. De señales ODUk máximo por OTUk							Velocidad Real (OTU) (Gbit/s)	Aplicación
		ODU0 1.2G	ODU1 2.5G	ODU2 10G	ODU25 26.4G	ODU3 40.3G	ODU50 52.8G	ODU4 104G		
OTU1	2.5	2	1	0	0	0	0	0	2.66	OC-48 STM-16
OTU2	10	8	4	1	0	0	0	0	10.7	OC-192 STM-64 10 G, 10GEth
OTU25	25	20	10	2	1	0	0	0	26.4	25 Gbit Ethernet
OTU3	40	32	16	4	1	1	0	0	43	OC-768 STM-256 40G, 40Gbit Ethernet
OTU50	50	40	20	5	2	1	1	0	52.8	50 Gbit Ethernet
OTU4	100	80	40	10	2	2	2	1	111.8	100G, 100Gbit Ethernet

Tabla 6 – Nro. Señales máximo ODUk en OTUk.

Fuente: Elaboración Propia.



CAPÍTULO IV
DISEÑO DE LAMBDA ALIEN EN DWDM

4. DISEÑO DE LAMBDA ALIEN EN DWDM

En los capítulos anteriores se ha descrito la arquitectura y propiedades de las redes ópticas, redes DWDM y las redes de transporte óptico OTN, de las cuales son fundamentales dentro de la investigación de la interoperabilidad de redes DWDM aplicando la solución Lambda Alien, esta solución a nivel técnico debe servir para el diseño de redes DWDM incluyendo mejoras y eficiencia adicionales a las brindadas por el uso de la arquitectura de redes OTN.

En la figura 6 se puede observar los componentes/equipos requeridos en DWDM, en la práctica estos dos componentes son los que más tecnología especializada utilizan para ser precisos en el manejo de las longitudes de onda, respetando las normas de estandarización indicadas en los capítulos anteriores. Unos de los principales retos en la construcción de redes DWDM es el crecimiento de demanda de ancho de banda constante y aún más existe un reto actual que se vienen en los próximos años a nivel mundial y en Bolivia específicamente ya se han realizado pruebas de 5G en el 2019, las redes 5G brindando hasta 10Gbps teóricos, hace que las redes backhaul y backbone que las soportan deban ser escalables a requerimiento.

La solución lambda alien fue mencionada por primera vez en los resultados de las pruebas de funcionamiento entre equipos Nortel y Alcatel-lucent para establecer un enlace experimental entre Amsterdam y Copenhagen [11].

Se denomina lambda alien que proviene del lenguaje técnico en inglés (alien wavelength) a la mezcla de capa de multiplexación de un operador con los transponders de otro operador, es decir a la lambda que no se origina en el mismo sistema DWDM de multiplexación se denomina lambda alienígena. La técnica lambda alien es una solución híbrida basada en las señales de transmisión y recepción de las capas de salida de transponder de una red DWDM hacia la capa de multiplexación de otra red DWDM. Señales originadas en otra infraestructura que es aceptada en la capa de multiplexación y adoptadas como señales propias. En la figura 9 se muestra el diagrama de la técnica lambda Alien entre dos redes DWDM.

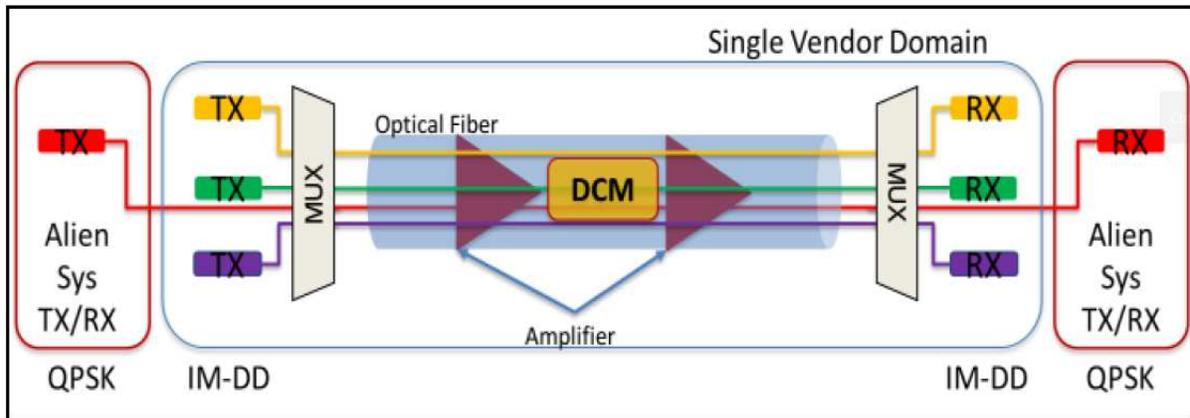


Figura 9 – Diagrama de técnica Lambda Alien.

Fuente: GARR. "Alien Wavelength Technique to enhance GARR optical Network"

En la figura se puede hacer la diferencia entre la capa óptica de multiplexación y amplificación de una red DWDM (bloque central de la figura 9) y la importación de señales alienígenas Tx/Rx con modulación propia hacia los multiplexores, se mencionará con el acrónimo LA (Lambda Alien).

4.1 Bloques Lambda Alien.

Como se mostró en la figura 9, el diagrama de integración de la técnica lambda alien toma en cuenta dos redes DWDM distintas y existe un punto de intercambio de servicios entre ellas, los puntos importantes en comparación con la jerarquía OTH es que el intercambio de produce entre las capas OTU, OCh y OMS. En el apartado 2.3.4 hemos descrito un nodo DWDM conformado por 3 componentes principales; Transponders, Multiplexores y amplificadores ópticos, estos en conjunto componen un nodo OTM para de una red DWDM.

Ahora para abordar el diseño de una solución LA vamos a clasificar y agrupar estos 3 componentes de tal forma que podamos distinguirlos entre los que pertenecen a uno u otro operador, esta agrupación es la siguiente y tiene 2 componentes solamente:

- Transponders: Conformado por los transponder propiamente.
- Sistema de Línea Óptico: Conformado por la capa de multiplexación, amplificadores ópticos, multiplexores ópticos fijo (OADM) y reconfigurables (ROADM). También es conocido como OLS (Optical Line System).

Para analizar el diseño de una integración con lambda alien debemos definir los componentes LA y los responsables de los ajustes necesarios, se define 3 bloques o partes principales:

- **Dominio Lambda Alien:** Son los elementos que están instalados en los puntos de servicio hacia las señales de cliente.
- **Dominio Nativo (host):** Son los elementos existentes y operativos que controlan la capa fotónica y la infraestructura de la fibra óptica.
- **Capa de adaptación:** Son los elementos necesarios para el acoplamiento de la señal lambda alien al dominio óptico nativo (host) y el ajuste de la potencia inyectada a los niveles adecuados.

Se debe tomar en cuenta que los 3 bloques descritos tienen funciones específicas que deben estar en acuerdo uno con el otro para poder llegar a una interacción directa entre ellas.

4.1.1 Dominio Lambda Alien (dominio LA).

Como se indicó en la clasificación de bloques de la solución lambda alien, en el bloque del dominio lambda alien el componente más importante está compuesto por el transponder en redes DWDM, correspondiente en la jerarquía OTH a las capas OTU y OCh en vista hacia la OLS del dominio nativo. Las características más importantes del transponder que deben considerarse para el intercambio de lambdas coloreadas se describen a continuación:

Transponder: El transponder lleva una señal de fibra óptica características de redes no DWDM en el lado de la interacción hacia los clientes, es decir opera señales ópticas de transceptores ópticos típicos de metroethernet, redes SDH convirtiéndola a una señal en las longitudes de onda de la grilla DWDM que se denomina lambda coloreado, una referencia de las longitudes de onda y canales está en la tabla 2.

En la figura 10 se muestra como el transponder convierte una señal no coloreada (850nm, 1310nm, 1550nm) a una señal coloreada en el rango 15xx.xx nm, que corresponde a la grilla de colores DWDM.

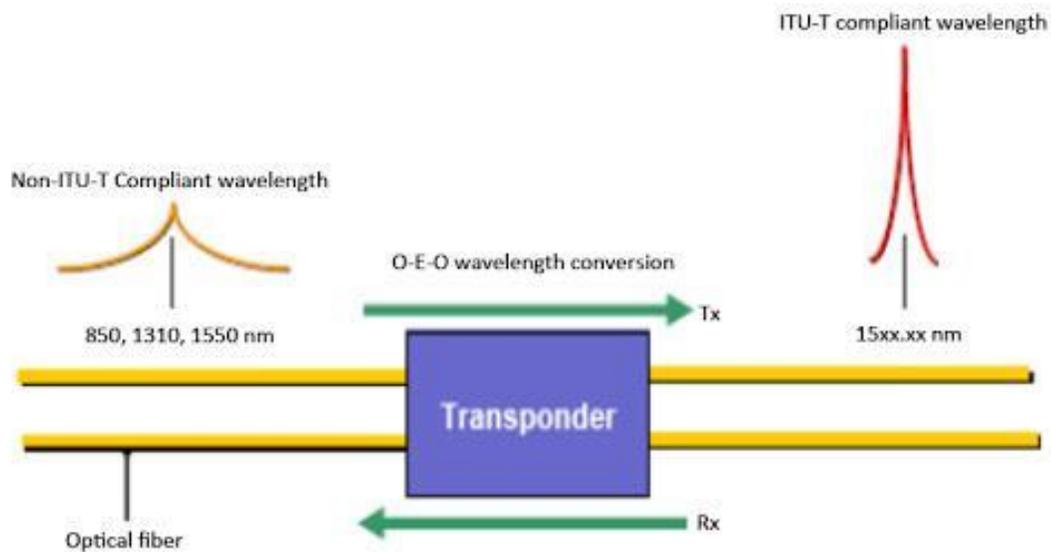


Figura 10 – Características transponder DWDM.

Fuente: Introduction to WDM Transponder [10].

4.1.2 Dominio nativo (Host).

Aunque el dominio nativo para lambda alien está compuesto por varios componentes que conforman también la estructura OLS (optical line system), el componente principal es el multiplexor que se usa para recibir las señales del dominio lambda alien, a continuación, se describe las características principales que necesitamos conocer.

El multiplexor tiene gran complejidad respecto a que debe aceptar en función de su configuración y capacidad, una gran cantidad de longitudes de onda propia del sistema que administra y aquellos que se recibirán de los transponder externos.

Multiplexor DWDM: El Multiplexor tiene la tarea de multiplexar las señales que provienen de uno o varios transponders en una única señal de salida, es decir cumple la tarea de sumar varias lambdas coloreadas en una sola portadora con diferentes longitudes de onda, en el caso de recepción el trabajo de multiplexor es demultiplexar las lambdas coloreadas a sus respectivos transponders y así poder entregar el transporte. En la figura 11 se muestra como ingresan señales coloreadas al mux y de estas salen multiplexadas en un solo haz.

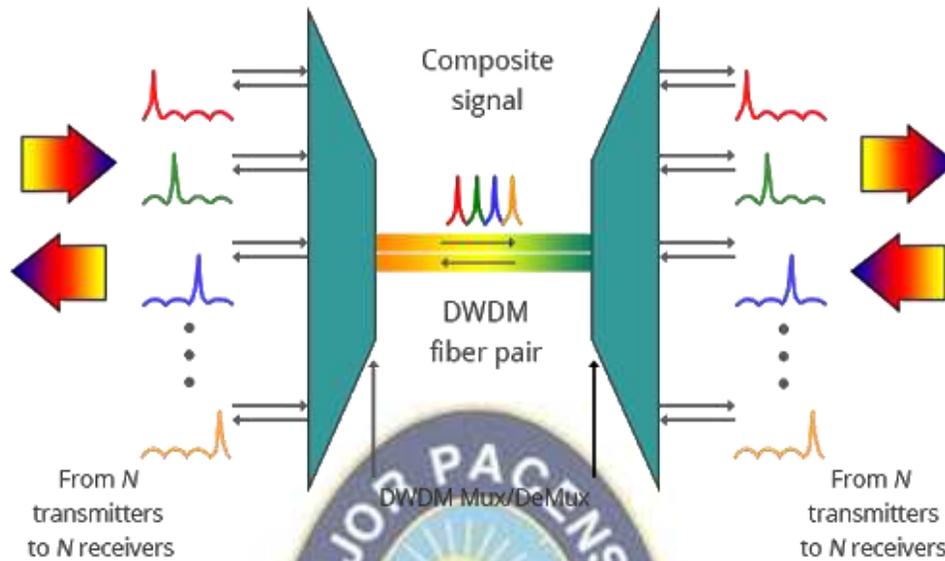


Figura 11 – Características Multiplexor DWDM.

Fuente: China Cables Supplier [12].

La tecnología óptica coherente constituye la base de los fabricantes por alcanzar velocidades de transporte de 100G y superiores, llevando Terabits de información a través de un único par de fibras. Los procesadores de señal digital compensan electrónicamente la dispersión de modo de polarización y cromática (CD y PMD) para permitir un rendimiento sólido sobre fibras antiguas y nuevas similares, y eliminan la necesidad de módulos de compensación de la pendiente de dispersión de la línea fotónica. La óptica coherente permite entregar mayor velocidad de transmisión de datos a un menor costo por bit.

En el dominio nativo, debido a que comparte un canal del espectro que administra con el dominio LA, este puede usar el espectro como más le llegue a beneficiar. Pueden suministrar múltiples longitudes de onda, o incluso uno o más super canales multiportadoras, esto significaría que en un canal de 100GHz otorgado por el multiplexor, el dominio lambda alien puede inyectar si le es posible 2 señales con espaciamiento de 50GHz o 4 señales de 25GHz. Los escenarios explicados tienen el potencial de perturbar la integridad general del sistema cuando los detalles de estas longitudes de onda no son visibles para el dominio nativo. Por eso es necesario realizar pruebas de medición del espectro en la señal LA antes del ingreso hacia el multiplexor.

4.1.3 Capa de adaptación.

En general una o varias redes DWDM se diseñan, implementan y operan en la misma tecnología de los fabricantes, tanto para transponders como para multiplexadores, amplificadores, repetidores, etc, Es decir los fabricantes proveen la solución completa para la implementación de los enlaces de transporte de la red DWDM, muchas veces esto es debido a lo mencionado en el apartado 2.3.5.4, que refiere el diseño de una red DWDM a una herramienta de software propietario del fabricante.

En la solución LA el dominio nativo tiene la infraestructura completa DWDM de un fabricante. En la figura 12 se muestra un ejemplo de conexión a una red DWDM de lambdas de 10Gbps que corresponde al dominio nativo y el dominio LA está compuesto por portadoras de 100Gbps de una red DWDM coherente.

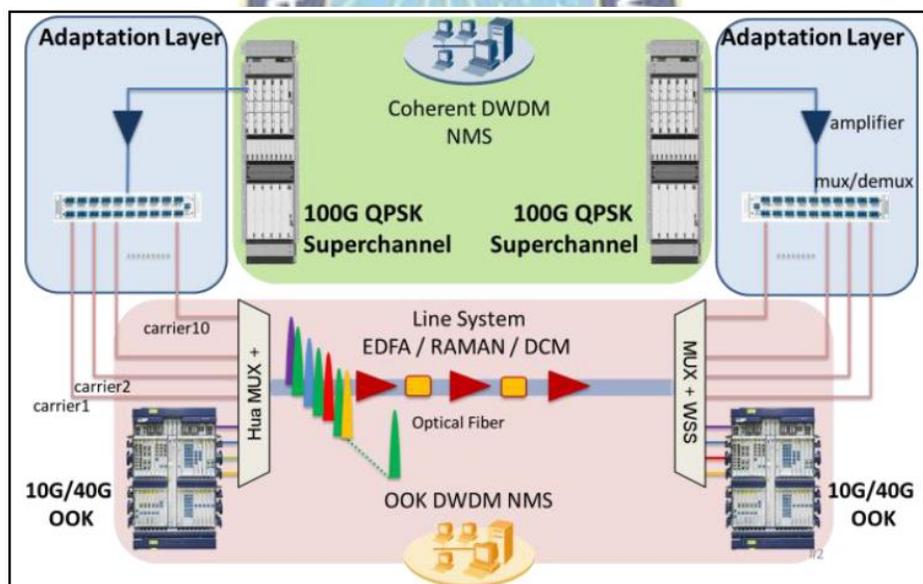


Figura 12 – Ejemplo de Capa de adaptación en Lambda Alien.

Fuente: GARR. "Alien Wavelength Techqinue to enhance GARR optical Network"

La capa de adaptación tiene que considerar dos aspectos importantes que son los elementos necesarios físicos para la interconexión, así como los parámetros de potencia que se inyectara en el dominio nativo. Ambos tienen que estar ecualizados y las mediciones de espectro confirmar los parámetros de las portadoras.

Interconexión en capa física: En la capa de adaptación a nivel de capa física, el intercambio de las lambdas del dominio LA y el dominio nativo deber realizarse tomando en cuenta desde el tipo de puerto de fibra óptica, la potencia de la señal y la distancia del dominio LA con el dominio nativo. Las consideraciones a nivel de capa física son las siguientes:

- Los tipos de conectores de fibra óptica. Estos deben ser los mismo en ambos extremos a la salida del transponder del dominio LA y el multiplexor del dominio nativo. Los tipos más conocidos de conectores son SC (Square Connector), LC (Little Connector) y FC (Ferule Connector) aunque por el tamaño de conector, mayormente se utiliza el conector LC. Figura 13.

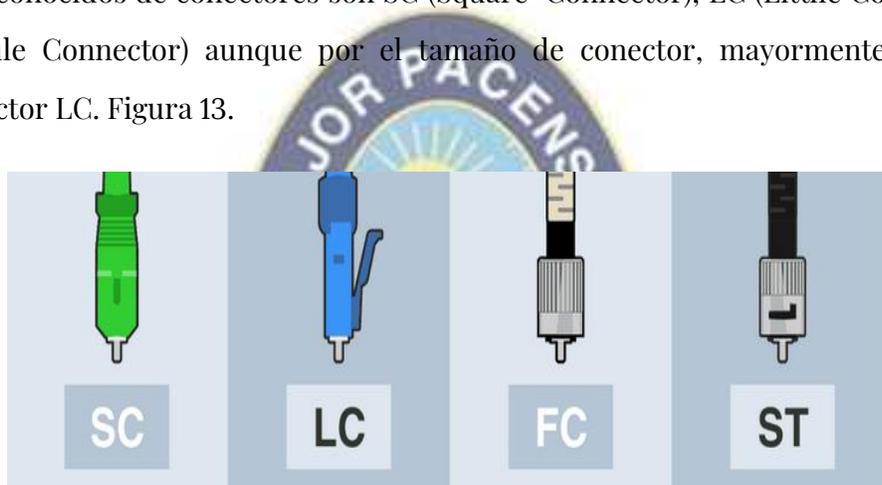


Figura 13 – Tipos de conectores fibra óptica.

Fuente: <https://www.promax.es/esp/noticias/578/Tipos-de-conectores-de-fibra-optica-guia-sencilla/> "Conectores de Fibra Óptica"

Adicionalmente para el cálculo de potencia y equalización se debe considerar la distancia que existe entre los equipos de cada dominio como se muestra en la figura 14, esto para considerar el tendido de fibra óptica si fuera necesario además del tipo de cable a utilizar, patchcord o cable de acometida, todos los detalles físicos son complementarios al diseño del dominio LA.



Figura 14 – Cableado entre dominios.

Fuente: elaboración propia.

4.2 Diseño de los dominios.

Como se mencionó anteriormente, para el diseño de una solución LA y desde el punto de vista de los dominios definidos, principalmente requerimos realizar el diseño para los 2 componentes que son:

- Dominio LA.
- Capa de adaptación.

No se toma en cuenta el diseño en el dominio nativo debido a que esta forma parte de la red activa de la red DWDM B (o red del otro operador), esto es equivalente a decir que la red DWDM B para realizar un mejor uso del espectro disponible de su red y toda su tecnología de la capa óptica OLS, se convierte en el arrendador de sus canales coloreados libres. Por otro lado, el dominio LA es el arrendatario de estos canales ofrecidos y requiere implementar equipos para inyectar la señal en la red DWDM B.

En el caso del **dominio LA** que pertenece a la red DWDM A, se debe diseñar sus componentes basados en el diseño completo de una red DWDM como se explicó en el apartado 2.3.5, en el caso específico, aunque debemos hacer la validación de todos los requerimientos, algunos puntos se van simplificando y en estas simplificaciones se va resaltando uno de los objetivos de esta solución que es la reducción de CAPEX. También se requiere añadir un punto más que es el diseño de canales ópticos de interconexión.

- a) Diseño a nivel de potencia óptica.
- b) Diseño de canales ópticos de interconexión.
- c) Diseño a nivel de ancho de banda.
- d) Diseño a nivel de ruido óptico. (No se requiere)
- e) Planeación de la red de fibra óptica. (No se requiere)

Antes de explicar en detalle los requerimientos de diseño, es necesario aclarar las restricciones a las cuales la solución está enmarcada, ya que debemos considerar que la solución LA brinda beneficios de optimización de CAPEX, pero depende en gran manera de las propiedades del

dominio nativo, lo cual no lo convierten en grandes desventajas sino en restricciones propiamente.

Restricciones:

- No se puede diseñar el grado de disponibilidad de la red debido a que este depende directamente de la propiedad del dominio nativo.
- No se puede diseñar la gestión de toda la red incluida el dominio nativo, la limitación de la gestión de la red es a los elementos que interactúan directamente en el dominio LA.
- La topología posible de la red también está limitada a la topología del dominio nativo, aunque se puede abrir aquí una línea de diseño de interacción con diferentes dominios nativos (Red B, C, etc) y complementar con diseño en redes DWDM propietarias para segmentos que se requieran y formar la topología final requerida.

4.2.1 Diseño de presupuesto óptico.

Los parámetros que debemos considerar en el diseño del presupuesto óptico de interconexión entre dominios LA son principalmente la *potencia de inyección requerida* en los multiplexores del dominio nativo. Debemos considerar que al ser una red DWDM activa, la misma fue diseñada con una cantidad definida de canales en el multiplexor.

Si necesitamos interconectar a un dominio nativo que cuenta con un multiplexor de n canales que tiene una atenuación de M (dB) a capacidad de ocupación de todos los canales disponibles, debemos agrupar todas las pérdidas asociadas a la atenuación de la fibra óptica, considerando también las pérdidas de los elementos de OLS y la red de fibra óptica de extremo a extremo, dentro del OLS un elemento que tiene un diseño fijo con un margen de trabajo configurable son los amplificadores. Esto sirve para la sintonización de la red.

En la figura 14.1 se muestra una red DWDM con los elementos de la capa óptica agrupados en el dominio nativo e interactuando con una señal alienígena proveniente del dominio LA. Las pérdidas asociadas en la capa óptica del dominio nativo pueden agruparse como el valor total

de pérdida PDN (*Perdida Total Dominio Nativo*) con unidades en dB, sabemos que este valor de PDN está agrupando las pérdidas en los multiplexores, pérdida de fibra óptica, la ganancia en los amplificadores, pérdida en los módulos de compensación cromática DCM y demultiplexores. Según lo anterior, los principales datos para diseñar el dominio LA provienen del dominio nativo y son;

- **Potencia de inyección aceptable:** Este dato es un valor nominal (no se aceptan variaciones muy grandes de potencia ya que pueden llegar a des-ecualizar la interacción de todas las portadoras en el multiplexor, denominamos a esta potencia requerida el nivel de potencia lambda alien de transmisión $PL_{\lambda TX}$.
- **Pérdida Total de Dominio Nativo:** Dentro del dominio nativo que contiene a toda la capa óptica y la red de fibra óptica, contiene varios elementos y componentes que contienen pérdidas, los MUX/DEMUX tiene pérdidas en función de los canales de capacidad que disponen y los canales que son utilizados, la pérdida de la fibra óptica depende de la longitud y la norma de del cable, la pérdida en los módulos de compensación cromática dependen de la longitud de la fibra óptica y la anchura espectral de las señales. Aunque estos valores son propios del dominio nativo, para el diseño de los transponder necesitamos conocer la pérdida total PDN en dB.
- **Canales utilizados/Canales Disponibles:** El multiplexor de dominio nativo tiene una capacidad total de canales, de las cuales para poder aceptar señales alienígenas mínimamente debe tener 1 canal disponible o libre. Este dato no se requiere directamente para el diseño del dominio nativo, pero sirve para conocer el canal óptico que debe entregar el transponder.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo para el cálculo de potencia óptica en el dominio LA, tomando en cuenta que el dominio nativo tiene capacidad de 8 canales, tiene una red de fibra óptica de 80km, tiene un amplificador y un módulo de compensación de dispersión cromática:

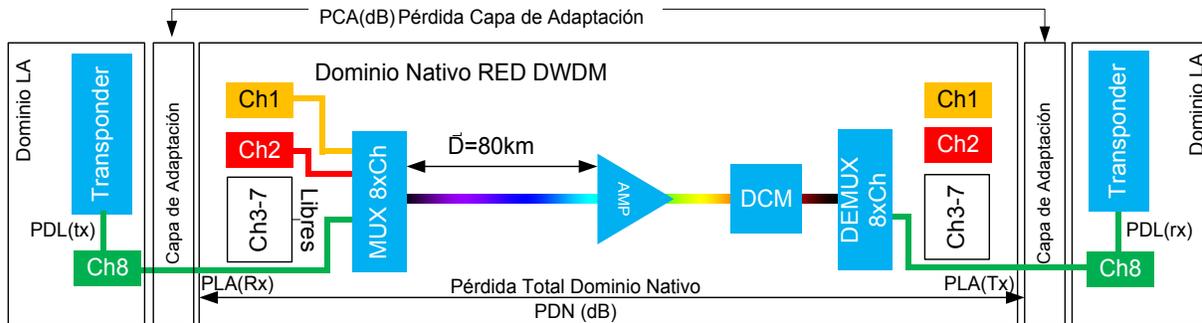


Figura 14.1 – Diseño de Potencia en Dominios LA.

Fuente: elaboración propia.

Como ejemplo del ajuste que requerimos a nivel de potencia óptica entre dominios LA, el dato de PLA es igual a +0,5 dBm, en la capa de adaptación tenemos pérdidas de los patchcords y conectores de 0,5 dB en cada extremo (considerando distancia menor a 50m), El valor de la pérdida total de dominio nativo PDN es igual a -24 dB.

Dominio	Elemento	Costo (dB)	Potencia de Salida (dBm)	Perdida por Dominio (dB)	Comentarios
LA	Transponder (Tx)		+1	-	Potencia Dominio LA (PDL)
Adaptación	Patchcords	-0,5	0,50	0,50	Nivel de Señal Requerido (PLA)
Nativo	MUX	-5	-4,50	-24,00	Multiplexación de 8 Ch DWDM
Nativo	80km Fibra Óptica	-27	-31,50		Perdida de Medio Físico
Nativo	Amplificador	+15	-16,50		Ganancia Ajustable
Nativo	DCM	-2	-18,50		Dispersion Compensation Module
Nativo	DEMUX	-5	-23,50		Demultiplexación de 8 Ch DWDM
Adaptación	Patchcords	-0,5	-24,00		0,50
LA	Transponder (Rx)		-24,00	-	Nivel de Señal Entregada

Tabla 7 – Ejemplo de Diseño de Potencia LA.

Fuente: Elaboración Propia.

Con los datos del ejemplo en la tabla 7 se muestra el cálculo de potencia óptica en los transponder del dominio LA, si el nivel de salida es +1 dBm como señal inyectada a la capa de adaptación, viajando a través de la red DWDM nativa del otro extremo tenemos una señal con una potencia de llegada a los transponders de -24dBm. Entonces tomando en cuenta que debemos tener un presupuesto de pérdida óptica entre la señal de recepción y el nivel de sensibilidad del receptor de mínimamente 3dB, requeriremos un transponder con una sensibilidad de -27dBm.

4.2.2 Diseño de OCh entre dominios Lambda Alien.

El diseño los canales ópticos en el dominio LA, se refiere específicamente al canal DWDM o lambda DWDM que se convertirá en la señal alienígena que se inyecta en el dominio nativo, aunque la selección de la lambda depende directamente de la capa OLS del multiplexor, necesitamos 2 datos importantes:

- Longitud de Onda λ : Según la grilla de canales DWDM disponibles en la capa de multiplexación del dominio nativo. Este dato es propietario de la red DWDM nativa ya que como se indicó anteriormente se puede tener multiplexores de 8, 16, 32, 40 λ canales ópticos y depende de la cantidad de canales ópticos disponibles. El dato de canal λ que debemos utilizar es definido por el dueño de dominio nativo, este dato debe estar en formato de THz o en nm, por ejemplo, el dominio nativo puede asignar al dominio LA el canal 59 según el plan de frecuencias ITU-Grid C con espaciamiento de 100GHz, esto significa según la tabla 2 que el canal asignado es $\lambda=1530,33$ nm o frecuencia de 192,9 THz.
- Espacio entre λ : El espaciado es definido por el diseño de la red nativa pero no depende del diseño en el dominio LA, es un dato igual definido por la red a la cual interconectaremos, pues este espacio es restrictivo junto con la longitud de onda asignado. El espaciado por lo general es de 100GHz en redes actuales DWDM, 200-400GHz en redes DWDM antiguas y 25-50GHz en redes nuevas.

Dentro del ancho de banda asignado según el λ y el espaciamiento respectivo, es posible agregar subdivisiones en factores de 2 que de igual forma no excedan al ancho de banda asignado, por ejemplo en el caso que se tenga asignado una frecuencia con espacio de 100GHz, es posible enviar 2 canales de 50GHz o 4 canales de 25GHz, siempre y cuando a nivel de potencia no se tenga valores fuera los aceptable en la red DWDM nativa, adicionalmente la señal coloreada del dominio LA debe ser ecualizado con las señales coloreadas nativas, esta ecualización asegura el comportamiento de toda la red DWDM nativa junto a la señal lambda alien.

4.2.3 Diseño de ancho de banda en dominio Lambda Alien.

El diseño de la capacidad o ancho de banda en Mbps de los clientes en el dominio LA, depende directamente de la capacidad de procesamiento óptico capaz de utilizar la frecuencia y espaciado asignado de la red DWDM nativa. Partiendo de estos datos principalmente podemos determinar la capacidad máxima de ancho de banda que podemos enviar por la λ asignada.

En función del espaciado en la red nativa, existen diversas opciones a nivel de los transponder que puede llegar a las siguientes capacidades:

- 100Gbps con Interface OTU4/100GigabitEthernet en 100GHz. 1 - LA.
- 2x100Gbps con Interface 2 x (OTU4 en 50GHz). 2 - LA.
- 200Gbps con Interface OTUC2 en 100GHz. 1 - LA.
- 2x200Gbps con Interface 2 x (OTUC2 en 50GHz). 2 - LA.
- 400Gbps con Interface OTUC4 en 100GHz. 1 - LA.

Las capacidades anteriores están en base a la grilla ITU-Grid C con espaciado de 100GHz, en función de la modulación y las subportadoras se pueden dimensionar hasta 400Gbps por canal, además según el espaciado asignado y el mínimo espaciado posible para las señales LA, se puede diseñar una capacidad en función de OTU4(100Gbps), OTUC2(200Gbps), OTUC4(400Gbps), estas dos últimas capacidades están disponibles desde hace unos años y aun los fabricantes están desarrollando técnicas de modulación y mejoras en el aprovechamiento del ancho de banda en GHz que las utilizan. Aunque con menor uso en la actualidad se puede tener el mismo análisis para capacidades de 40Gbps sobre OTU3.

La capacidad en lado de los clientes está en función principalmente de la capacidad en la señal LA, es obvio que no puede excederla y está restringido por la división en factores de capacidades menores y la multiplicación de la cantidad de puertos. Por ejemplo, si se tiene una señal OTU4 entonces a nivel de cantidad de puertos es correcto tener un transponder de 10 puertos de 10Gbps. La capacidad de referencia a nivel de cliente está en el apartado 2.3.5.2.

4.2.4 Diseño en la capa de adaptación Lambda Alien.

El diseño de la capa de adaptación está en función del uso del espectro asignado en la red DWDM nativa, las características principales que debemos abordar en el diseño son las siguientes:

- **Tipo de puertos y conectores en el dominio LA y nativo:** Según la recomendación ITU-T L.402 las pérdidas deben ser $\leq 0,3\text{dB}$ en los conectores utilizado, la pérdida total por la conexión entre dominios es $\leq 0,6\text{dB}$, valores típicos son entre 0,3 -0,5 dB en total por pérdida de conectores. Este valor debe ser tomando en cuenta dentro del cálculo de presupuesto óptico en el dominio LA (ejemplo de la tabla 7). Los conectores más utilizados son LC porque son pequeños y compactos para reducción de espacio.
- **Distancia entre dominios:** La capa de adaptación toma en cuenta la distancia física que puede existir entre los nodos o ubicaciones geográficas de cada dominio, aunque es preferible que la distancia entre dominios sea la menor posible. El diseño de un enlace de fibra óptica está explicado en el apartado 2.3.5.5 y los criterios son válidos para el diseño de los enlaces requeridos en esta capa, se debe tomar en cuenta dos limitantes muy importantes que son el tiempo de implementación y pérdida asociada a distancia.
- **Cálculo de pérdida óptica y uso de atenuadores:** Considerando la distancia y conectores utilizados entre el dominio LA y el nativo, como se indicó la capa OLS debe tener una correcta interconexión a nivel de parámetros de potencia y ancho de banda, entonces, para este fin debemos tomar en cuenta la potencia de señal requerida en el dominio óptico PLA (dBm), la pérdida total del medio físico según el cálculo de la ecuación 2.4 del apartado 2.3.5.1 y el nivel de potencia de la señal de salida PDL (dBm) en el dominio LA.

La ecuación que utilizamos de la potencia requerida en el dominio LA es:

$$PLA_{rx} (dBm) = PDL_{tx} (dBm) - \text{Pérdida Medio Fisico}(dB) \quad (4.1)$$

Debemos considerar que el target de potencia está en función de la potencia PLA requerida en la red DWDM nativa.



CAPÍTULO V
INTERCONEXION E INTEROPERABILIDAD DWDM
EN LAMBDA ALIEN

5. INTERCONEXION E INTEROPERABILIDAD DWDM EN LAMBDA ALIEN

Uno de los retos importantes dentro de una solución LA es poder definir los aspectos de interoperabilidad posibles entre la red DWDM nativa y el dominio LA. Por esta razón es necesario conocer los tipos de casos que se pueden presentar cuando se diseñan redes DWDM con LA, según el anterior capítulo el diseño se realiza para el dominio LA y la capa de adaptación principalmente, ya que el dominio nativo se considera como una red DWDM existente y no requiere un diseño como tal, sino más bien un ajuste con la red del dominio LA, entonces para el estudio de interoperabilidad en la capa óptica DWDM con LA, debemos conocer los tipos de redes DWDM nativas con las cuales podemos interconectar y los límites que nos brindan dentro de su propia red.

5.1 Capa de transporte óptico Lambda Alien.

La capa de transporte óptico en lambda alien está conformado por las interfaces ópticas DWDM a la salida de los transponders (Optical Transponders) en el dominio LA y las interfaces ópticas DWDM al ingreso a los multiplexores OMU del dominio nativo, además se debe tomar en cuenta en la capa de transporte óptico los casos que requieran el diseño de una capa de adaptación con etapas de amplificación, aunque esto no es lo común ya que en general las conexiones entre dominios no son mayores a los 10km.

En este capítulo veremos los tipos de capa óptica que podemos encontrar cuando diseñamos una red DWDM con LA, en la mayoría de los casos podemos tener que diseñar la interconexión con redes DWDM heredadas o con redes DWDM actuales, un caso particular que se presentará en el futuro y/o en redes DWDM que se implementaron desde 2021 hacia adelante, es la interconexión LA con redes DWDM abiertas bajo estándares que aún están en construcción y estudio por varios fabricantes, este último se ha denominado redes DWDM Open Optical Line System (Open OLS).

5.2 Especificaciones técnicas para la interconexión.

La solución LA es muy importante para la interconexión con otros operadores y poder hablar ya no de alquiler de ancho de banda de terceros o capacidad en Mbps, sino de alquiler de espectro óptico. Ya dentro del espectro alquilado podemos modular señales coloreadas (lambda de la grilla DWDM) de diferentes capacidades, de acuerdo con el requerimiento de capacidad de los clientes, se pueden modular en una señal o varias, siempre y cuando no excedamos el espectro asignado desde OTU1 (2,5Gbps) hasta OTUC4 (400Gbps).

Aunque no tenemos limites inferiores a nivel tecnológico en LA para definir la capacidad de línea de una lambda alienígena, no se recomienda el diseño de LA para capacidades de OTU1 (2,5Gbps) y OTU2 (10Gbps), debido a que el diseño del dominio LA y los costos de implementación pueden ser similares al alquiler de una capacidad 10Gigabit Ethernet y tampoco se está aprovechando la verdadera capacidad del espectro óptico alquilado.

Según lo indicado en párrafo anterior, se recomienda el diseño e implementación de una solución LA a partir de las capacidades de OTU3 (40Gbps) y para realizar un mejor aprovechamiento del espectro alquilado; es preferible utilizar la solución LA para capacidades de OTU4 (100Gbps), OTUC2 (200Gbps) y OTUC4 (400Gbps) hacia adelante. En cuanto a la capacidad máxima que podemos modular sobre una sola lambda, actualmente tenemos limitaciones de tecnología óptica que están en desarrollo e investigación, actualmente algunos proveedores ofrecen capacidad de 800Gbps.

5.2.1 Single-Carrier DWDM en el dominio Lambda Alien.

Posterior a las primeras redes DWDM con capacidad de 2.5G y 10G donde como vimos la interoperabilidad LA es limitada y en muchos casos nula, posteriormente se presentaron varias limitaciones de modulación y compensación que no permitían crecer en velocidad ni distancia de los enlaces de fibra óptica, esto en referencia a la capacidad que se puede lograr sobre una sola portadora λ (lambda DWDM) o lo que se denomina Single-Carrier, ya entre el año 2000 y 2010 se realizaron mejoras los tipos de modulación/detección y el gran salto de 10G

a 40G se basó en la evolución de la modulación básica OOK (On/Off Keying) a tipos de modulación de mayor complejidad como BPSK o QPSK, finalmente el salto tecnológico que permitió mejorar esta barrera de 10G fue la introducción de *tecnologías ópticas coherentes*, con capacidad de compensar la dispersión PMD y reducir las pérdidas de los efectos no lineales.

En la figura 15 se muestra la evolución de capacidad en redes DWDM desde 2.5G, aunque los retos principales de crecimiento de capacidad fueron vencidos por soluciones tecnológicas, en la actualidad se continúa realizando mejoras de la capa óptica para obtener mayores velocidades, la figura 15.2 muestra también la línea de tiempo de la evolución comercial tecnológica de DWDM.

El principal avance tecnológico que permitió dar el salto es escalamiento de capacidad single-carrier en DWDM fue la adopción de tecnologías coherentes, este fue el verdadero punto de inflexión en el crecimiento de la capacidad, esto es sin considerar la capacidad de la capa óptica de multiplexación que permite varias o decenas de λ sobre una misma señal de línea y que tiene su propia evolución tecnológica hasta las redes DWDM actuales, en la solución LA se debe tomar en cuenta ambas tecnologías para el diseño tanto del dominio LA cómo el nivel de interoperabilidad en la interconexión con del dominio nativo.

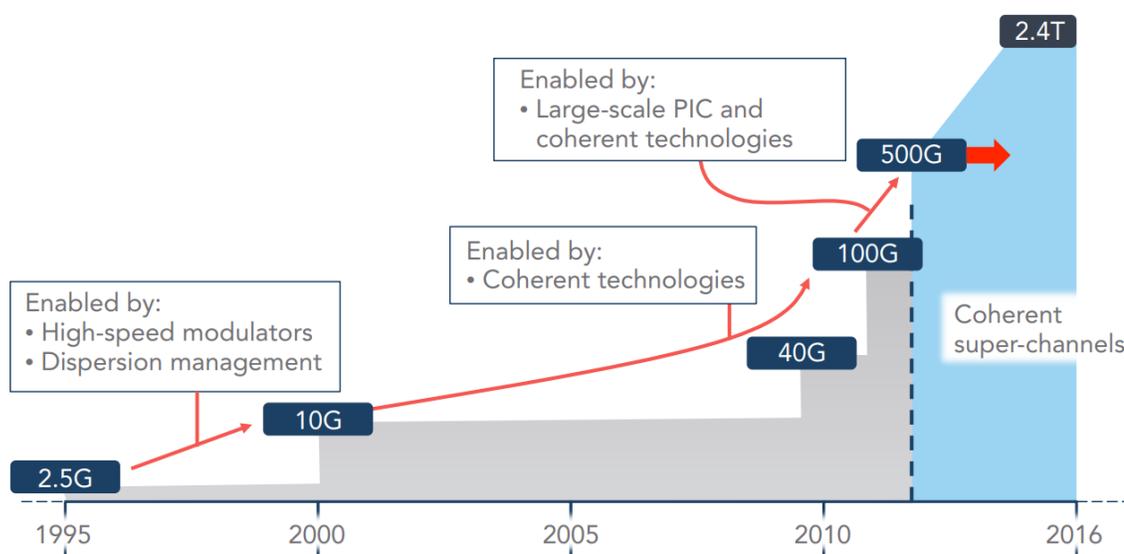


Figura 15 – Habilitadores Tecnológicos para mejora de capacidad DWDM.

Fuente: Artículo INFINERA- Whitepaper: "Coherent DWDM Technologies (infinera.com)"

Si nos fijamos en la huella tecnológica de DWDM, en la actualidad es posible encontrar operando redes DWDM de 40G a punto de convertirse en redes legacy por su tiempo de vida útil, es posible que actualmente este tipo de redes aun cuente con soporte de fabricante y repuestos para su operación, pero cerca del 2025 posiblemente se deje de tener soporte técnico y entre en un periodo de End of Life (fin de su vida útil).

Para el caso de redes 100G, si realizamos una estimación de la existencia de redes con esta capacidad, posiblemente en la actualidad una gran parte de las redes DWDM (aprox. 50%) este trabajando con esta capacidad, aunque esta brecha se va disminuyendo, tecnologías emergentes con capacidades de 200G, 400G van ganando una porción de las redes actuales.

En la actualidad y desde el año 2020, varios fabricantes de solución DWDM están ofertando comercialmente capacidad de 800G en single-carrier, fabricantes como CIENA e INFINERA son pioneros en esta solución, aunque por el momento tienen tecnología propia que las soporta, en el caso de CIENA la capacidad de 800G es soportado por su tecnología wavelogic 5 [38] que permite mejorar la eficiencia espectral y escalabilidad de la red.

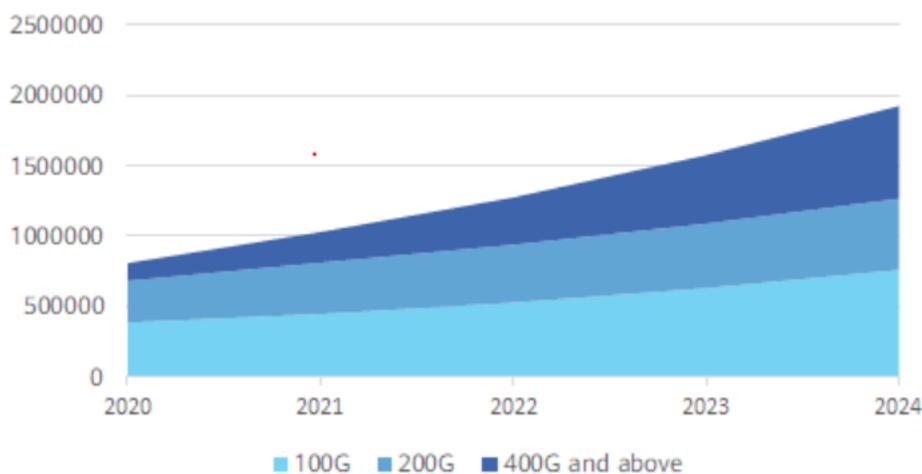


Figura 15.1 – Proyección de puertos DWDM por capacidad.

Fuente: Artículo HISILICON- Whitepaper: “400G All-Scenario Optical Modules White Paper” [39]

La proyección en los siguientes años del crecimiento de tecnologías de transmisión óptica en single-carrier para capacidades de 100G, 200G y 400G, se muestra en la figura 15.1, como se puede apreciar el crecimiento natural de puertos 100G en la actualidad.

5.2.2 Capa óptica en el dominio nativo.

En este apartado veremos las opciones de redes DWDM nativas que podemos encontrar en la actualidad (fuera de las redes DWDM Legacy) y además los escenarios de capa óptica de multiplexación OMS de redes DWDM para realizar la interconexión de nuestra solución LA. EL multiplexor DWDM es el elemento más importante en la capa de transporte óptico pues permite finalmente la multiplexación de las señales coloreadas combinarse en una sola señal de salida que es lanzada al medio posterior a una etapa de amplificación. Aunque el Mux/Demux o MUX simplemente, es el elemento común que podemos encontrar al momento de interconectar la señal LA, también existen escenarios más complejos donde requeriremos conectar a multiplexores tipo OADM, ROADM, FOADM.

5.2.2.1 Multiplexores DWDM.

Los escenarios de multiplexores de la capa óptica del dominio nativo que podemos encontrar son los siguientes:

- Multiplexor/Demultiplexor con tipo de puertos dual (2 hilos de fibra óptica para Tx/Rx) o unifilar (Tx/Rx) sobre una misma fibra óptica. Aunque en general el tipo de puerto más utilizado es dual.
- Multiplexor/Demultiplexor con capacidad de puertos desde 4 a 96 canales, que pueden utilizar longitudes de onda de la Banda C (1525-1565 nm) y la Banda L (1565-1620 nm).
- El dueño del dominio nativo debe indicar los canales disponibles de su grilla en los mutiplexores.
- Canales Ópticos OCh estándar de 0,8nm para espaciamiento de 100GHz o 0,4nm para espaciamiento de 50GHz.
- Multiplexor/Demultiplexor equipado con puerto de monitoreo para mediciones OSNR sin interrupción de servicio.

También se tienen los tipos de Mux/Demux Pasivos/Activos:

Multiplexor Activo: Tienen incluido tecnología de láser y filtro de longitud de onda ajustable, este tipo de multiplexores brinda a nivel de configuración mayor control y monitoreo de la red activa, permite realizar una sintonización dinámica de las longitudes de onda sin perder conexiones activas. Este tipo de multiplexores se encuentra en redes long-haul y de alta capacidad como redes backbone y backhaul. Utiliza energía para su funcionamiento.

Multiplexor Pasivo: No utiliza energía para su funcionamiento, es libre de mantenimiento, configuración y actualizaciones para operar, incluyen dispositivos de interferencia, acopladores ópticos. Este tipo de equipos se fabrican listos para su funcionamiento, bajo la lógica plug&play, enchufar y funcionar. Este tipo de equipos se encuentra mayormente en redes metropolitanas fijas, redes medianas de empresas e industrias, es utilizando bastante en aplicación de capacidades medianas y no de gran capacidad como los requeridos en operadores de telecomunicaciones.

El Multiplexor activo es el más adecuado para la solución LA, debido a que ofrece funciones OAM (Operations, administration and management), además de que permite una fácil integración de la señal alienígena y ayuda en la ecualización de la red.

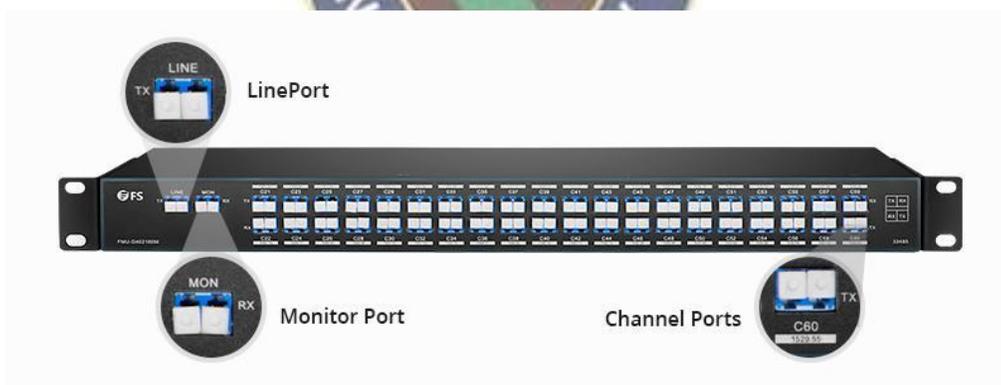


Figura 15.2 – Modelo Multiplexor DWDM Activo.

Fuente: FS Community "DWDM Mux/Demux Overview - Working Principle and Different Types" [40]

En la figura 15.2 se muestra un modelo de multiplexor modular y no como tarjeta, este modelo permite optimizar el espacio y diseño de redes DWDM tradicionales que siempre tenían presentación en modo chasis completo. En la figura 15.3 se muestra un multiplexor en chasis de un modelo de equipo DWDM tradicional.

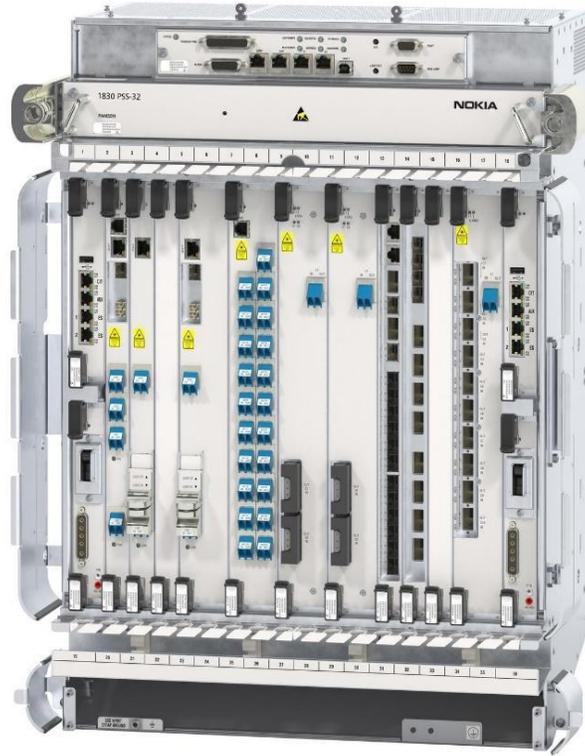


Figura 15.3 – Modelo Multiplexor en Chassis DWDM.

Fuente: <https://www.nokia.com/networks/products/1830-photonic-service-switch/> “1830 Photonic Service Switch”

5.2.2.2 Multiplexores ópticos ADD-DROP.

El segundo tipo de escenario de interconexión para LA, son redes DWDM modernas que en la actualidad pueden encontrarse operando en la misma cantidad que redes tradicionales, a este tipo de redes se los denomina redes DWDM NG o new generation.

Son redes DWDM que utilizan elementos avanzados tecnológicamente para conformar topologías de diferentes tipos en base a las tradicionales; desde enlaces punto a punto, anillos simples, dobles, interconectados hasta mallas. Para esto se apoyan en multiplexores ópticos Add/Drop OADM o sus variantes tecnológicas.

En la figura siguiente, se muestra los iconos de elementos de red DWDM que permiten representar diferentes topologías de red en diagramas esquemáticos.



Figura 15.4 – Iconos de elementos en redes DWDM.

Fuente: <https://www.slideshare.net/taipm1086/huaweinetworkicondatabasev2-130509181727phbpbp02> "Iconos DWDM".

OADM es un componente fundamental de redes ópticas DWDM con capacidad de multiplexación y enrutamiento de canales ópticos, permite tomar una señal DWDM conformado (es decir multiplexada con varias lambdas coloreadas) y extraer alguno o varias longitudes de onda, además permite añadir nuevas longitudes de onda en la señal DWDM.

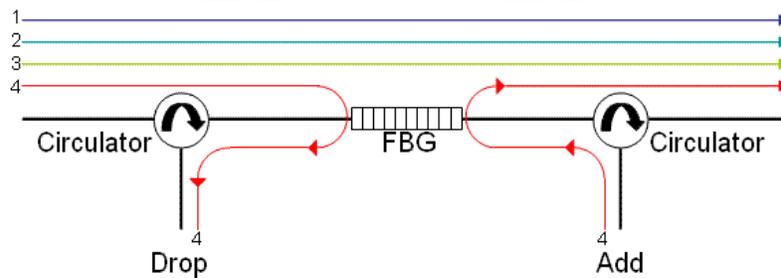


Figura 15.5 – Funcionamiento de Multiplexores OADM

Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_add-drop_multiplexer "Optical add-drop multiplexer".

El elemento OADM tiene 3 componentes fundamentales; Demultiplexor óptico, multiplexor óptico y un método de reconfiguración de las rutas de las longitudes de onda en la señal conformada, en la figura 15.5 se muestra un ejemplo de OADM con 4 longitudes de onda (1-4) y el canal 4 es extraído mediante un circulator óptico y una rejilla de Bragg FBG (fiber bragg grating). Existen diferentes tipos de interruptores ópticos de reconfiguración de OADM [41].

FOADM (Fixed Optical Add/Drop Multiplexer): Componente que tiene un diseño fijo basado en OADM, donde se tiene un diseño de inserción/extracción fija basado en filtros no reconfigurables, tiene un plan de inserción/extracción basada en los requerimientos de cliente. Tiene características de cantidad de canales, especificaciones de filtros y equalización de potencia óptica, Todos los ajustes o reconfiguración de FOADM son de forma manual y representa un alto costo operativo.

ROADM (*Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer*): Es un componente basado en principios OADM muy importante en la solución de redes anillos y mallas, la función más importante es la capacidad de reconfiguración por software de la extracción e inserción de longitudes de onda y la conmutación de tráfico entre distintas rutas DWDM.

Características principales y puertos de elementos basados en OADM:

A continuación, explicamos los puertos que podemos encontrar en este tipo de elementos.

- *Puertos de Tributarios*: Son los puertos Add/Drop de señales λ DWDM donde se extrae una longitud de onda. Este tipo de puerto es donde se deben interconectar la señal proveniente del dominio LA.
- *Puertos de Conexión entre OADMs*: Denominados grados de OADM, es la cantidad de puertos disponibles para interconexión entre elementos OADM, OTM, que permite definir los diferentes escenarios topológicos de una red DWDM. El escenario más simple es un elemento con 2 grados para interconectar 2 nodos.

Los puertos de tributarios son los que utilizaremos para inyectar la señal LA, estos puertos tienen características muy similares a los puertos descritos para interconexión LA con Multiplexores del dominio nativo.

- Según el tipo de OADM/FOADM/ROADM tienen capacidad de puertos desde 4, 8, 16 a 40 puertos o más según el tamaño y topología de la red DWDM nativa.
- Las longitudes de onda reconfigurables en los puertos add/drop pueden utilizar longitudes de onda de la Banda C (1525-1565 nm) y la Banda L (1565-1620 nm).
- El dueño del dominio nativo debe indicar los canales disponibles de su grilla en los puertos add/drop.
- Canales Ópticos OCh estándar de 0,8nm para espaciamiento de 100GHz o 0,4nm para espaciamiento de 50GHz.
- OCM (Optical Channel Monitor) permite el ajuste de potencia en la interacción con la señal del dominio LA, además de la reconfiguración efectiva de rutas entre diferentes puertos.

5.2.3 Parámetros de la interconexión Lambda Alien.

En la actualidad tenemos diferentes tecnologías de redes DWDM de varios fabricantes que pueden coexistir en una misma red de un operador de servicios, por lo general las redes backbone y backhaul son las que realizan mayor uso de tecnologías DWDM, adicionalmente con la estandarización de OTN como tecnología de capa óptica, en la actualidad se pueden tener diferentes escenarios de interconexión.

Los componentes, tipos de puertos y capacidades de los elementos en la capa óptica tanto en dominio LA y dominio nativo fueron explicados en los apartados anteriores, ahora para el estudio de la interoperabilidad LA abordaremos dos enfoques:

- a) Interconexión e Interoperabilidad LA, definición de alcance posible según las recomendaciones ITU-T. Este punto será abordado en este apartado.
- b) Interoperabilidad LA en la capa óptica de los fabricantes de equipamiento DWDM y desarrollo de soluciones posibles según la oferta de los fabricantes. Este punto será abordado en el apartado 5.4.

Aunque en ambos casos como en cualquier diseño de una red óptica tradicional requerimos el diseño y cálculo de presupuesto de potencia óptica explicados en el punto 4.2.1, necesitamos delimitar la solución LA en 3 puntos adicionales:

1. Los parámetros más importantes y los límites posibles dentro de la interacción en la capa óptica de dos tipos de equipamiento o equipos de diferentes redes y fabricantes en la solución LA. Este punto será abordado en este apartado.
2. Convergencia de la solución LA actual ofrecida por el estándar OTN y los fabricantes y el futuro de la interoperabilidad de redes ópticas. Este punto será abordado en el apartado 5.3.
3. El requerimiento de ecualización y sintonización de los parámetros ópticos en la interconexión LA para asegurar la correcta interoperabilidad de la solución. Este punto será abordado en el capítulo 6.

5.2.3.1 Interoperabilidad de capa óptica Multi-vendor.

Para abordar los puntos indicados anteriormente, vamos a partir de las recomendaciones de la unión internación de telecomunicaciones ITU-T que se explicaran en detalle en este apartado, cubriendo el punto (a) y el punto (1) del estudio de la interoperabilidad de la solución LA. Aunque las especificaciones orientadas a un ecosistema abierto de redes DWDM en la capa óptica aún están siendo desarrolladas por la ITU-T en la recomendación del grupo de estudio SG15/Q6 y otros, podemos tomar los lineamientos principales del desarrollo de esta recomendación y la recomendación ITU-T G.698.2 para definir los parámetros y especificaciones de interoperabilidad LA.

La interoperabilidad en la capa óptica de las señales LA hacia el dominio nativo puede esquematizarse en 2 escenarios principales, donde necesitamos definir de la interacción a través de las interfaces de cada dominio. El primer escenario es la interacción de señales Tx λ_1 -N y Rx λ_1 -N provenientes del dominio LA y que se inyectan hacia el dominio nativo, este escenario se muestra en la figura 16, se definen puntos de referencia de interconexión respecto de la red DWDM o enlace DWDM; Ss (punto de referencia de entrada) y Rs (punto de referencia de salida), los puntos de referencia sirven para delimitar las especificaciones de los parámetros ópticos en la red DWDM nativa.

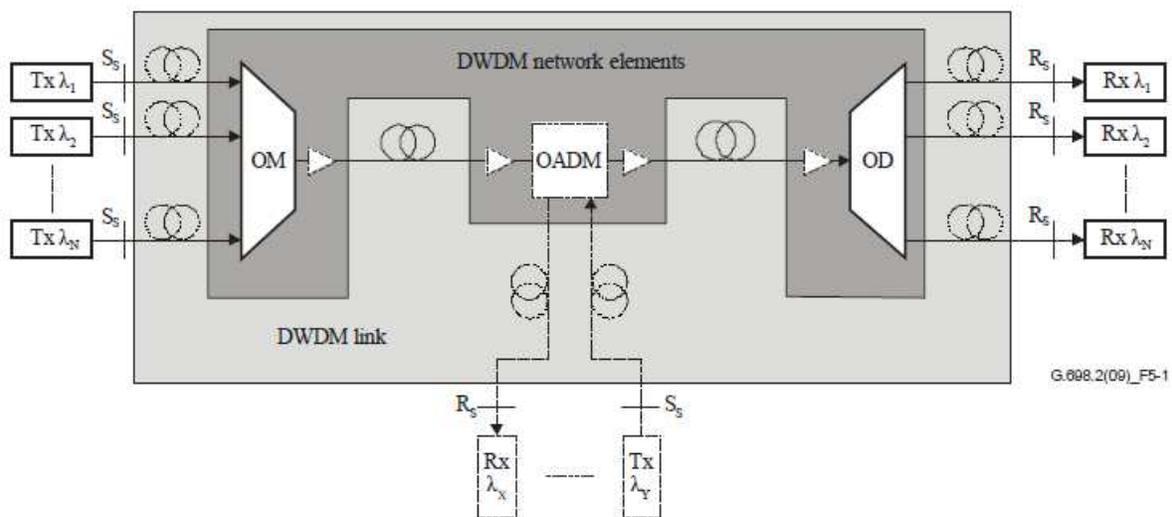


Figura 16 – Esquema Lineal de Interacción con Dominio Nativo

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

Para la interconexión se define un path “black link” que permite el transporte entre S_s y R_s de los tributarios ópticos de entrada y salida $T_x \lambda_{1-N}$ y $R_x \lambda_{1-N}$, los puntos de referencia y su ubicación son de responsabilidad del dominio nativo.

Bajo el mismo enfoque, el segundo escenario se muestra en la figura 16.1 y es cuando tenemos varios enlaces DWDM en topología anillo, las interfaces de conexión de una lambda alien $T_x \lambda_1$ y $R_x \lambda_1$ y los puntos de referencia S_s y R_s son los mismos.

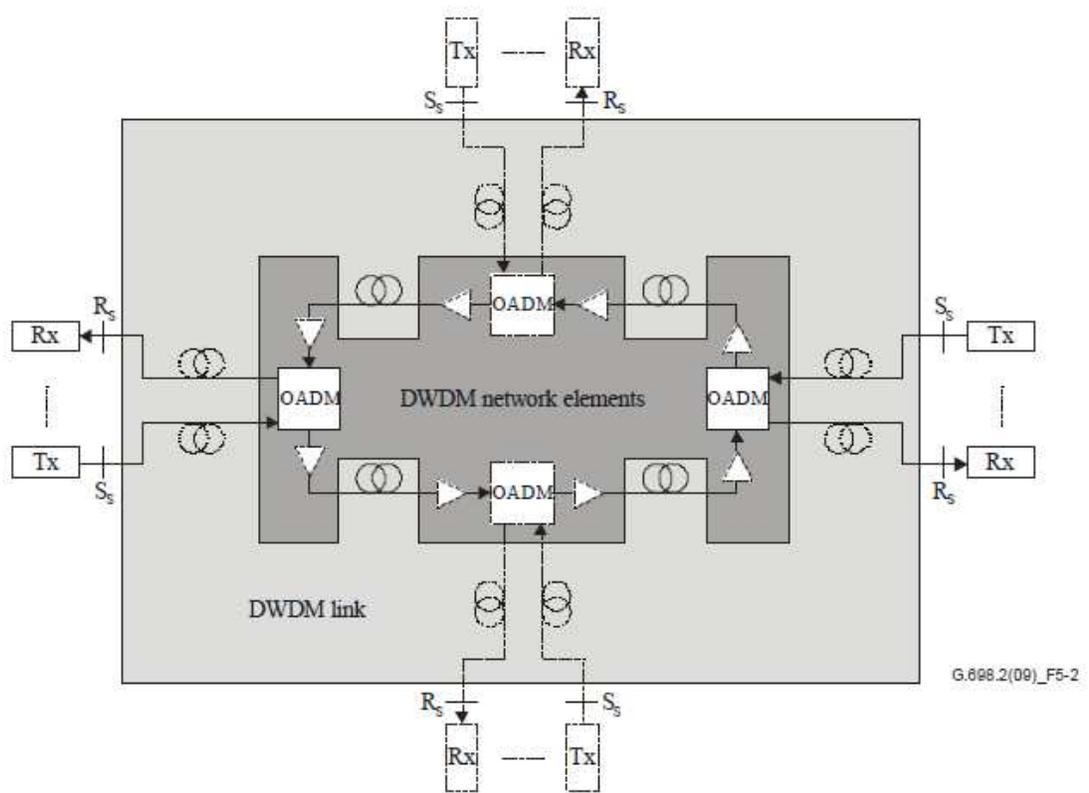


Figura 16.1 – Esquema Anillo de Interacción con Dominio Nativo

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

Ambos escenarios descritos son similares y debido a que los puntos de referencia son los mismos, el análisis de las especificaciones paramétricas de la capa óptica son las mismas en ambos escenarios, ampliando aún más el enfoque, este mismo análisis servirá para la interacción LA con diferentes escenarios que pueden ser más complejos.

Código de Aplicación:

Para poder hacer referencia a la interconexión de una señal alienígena al enlace DWDM nativo (*black link*), se debe usar una notación que se denomina “Código de Aplicación” permite conocer detalles técnicos de la interconexión que resumen varios parámetros de operación de la capa óptica de la red DWDM nativa. Este código de aplicación sirve también para mostrar algunos detalles de la red nativa que permitirán el diseño del dominio LA y sus limitaciones.

La notación está conformada por la siguiente nomenclatura:

$$DScW-ytz(v) \quad (5.1)$$

Donde:

- **D** indica que se trata de una aplicación DWDM.
- **S** indica las opciones de la máxima excursión espectral como:
 - **N** indica una excursión espectral estrecha.
 - **W** indica una excursión espectral amplia.
- **c** indica el espaciamiento de canales en GHz.
- **W** indica el tipo de compensación a la dispersión como:
 - **C** indica que los valores de dispersión cromática son apropiados para un enlace DWDM que tiene compensación de dispersión.
 - **U** indica que los valores de dispersión cromática son apropiados para un enlace DWDM que no tiene compensación de dispersión.
- **y** indica la clase más alta de señal tributaria óptica admitida:
 - **1** indica señal NRZ 2.5G. NRZ (no retorno a cero)
 - **2** indica NRZ 10G.
 - **8** indica DP-DQPSK 100G.
- **t** indica la configuración admitida por el código de la aplicación. En la versión actual de la recomendación ITU-T G.698.2 el único valor utilizado es:
 - **A** indica que la red nativa puede contener amplificadores ópticos.

- **z** indica los tipos de fibra, de la siguiente manera:
 - **2** indica fibra ITU-T G.652.
 - **3** indica fibra ITU-T G.653.
 - **5** indica fibra ITU-T G.655.
- **v** indica el rango de longitud de onda operativo en términos de bandas espectrales:
 - **S** Banda S (longitud de onda corta)
 - **C** Banda C (Convencional)
 - **L** Banda L (Longitud de onda larga)

A la nomenclatura indicada, también puede encontrarse antes del código la letra **B** que indica que es bidireccional y también al final del código la letra **F** que indica la aplicación requiere FEC como especifica ITU-T G.709.

El código de aplicación permite al dueño de la señal LA conocer algunos aspectos importantes al momento de diseñar la solución LA sobre una red DWDM nativa, sin necesidad de conocer con todo detalle la estructura o topología de la red, también permite al dueño del dominio nativo, brindar información útil que permita a su red interactuar de mejora manera con las señales LA, define límites aceptables para la interconexión y sintonización de la red, convirtiéndose en el primer input para el análisis de interoperabilidad de la solución LA.

De acuerdo a esta nomenclatura de códigos de aplicación, las opciones que una red DWDM nativa puede ofrecer de acuerdo a la recomendación ITU-T G.698.2 para la interacción con tributarios ópticos monocanal o que están en formato de single-carrier, son diversas.

Las opciones de códigos de aplicación se muestran en la tabla siguiente y son la referencia de las aplicaciones que podemos desplegar en un enlace black link visto desde el dominio LA, aunque no sean limitaciones técnicas o de capacidad óptica de la red DWDM nativa, sin son las características recomendadas por el propietario de la red DWDM nativa y debe ser consideradas mandatorios para asegurar la interoperabilidad, aunque el código de aplicación puede ser consensuado entre partes, no debe ser modificado por ninguno y **puede formar parte de un acuerdo de interconexión.**

Tributario óptico	Dispersión compensada	Dispersión no Compensada
NRZ 2.5G	DN100C-1A2(C) DW100C-1A2(C) DN100C-1A3 (L) DW100C-1A3 (L) DN100C-1A5(C) DW100C-1A5(C)	DN100U-1A2(C) DN100U-1A3 (L) DN100U-1A5(C)
OTU1 con FEC habilitado	DW100C-1A2(C)F DW100C-1A3(I)F DW100C-1A5(C)F	
NRZ 10G	DN100C-2A2(C) DW100C-2A2(C) DN100C-2A3 (L) DW100C-2A3 (L) DN100C-2A5(C) DW100C-2A5(C) DN50C-2A2(C) DN50C-2A3 (L) DN50C-2A5(C)	
OTU2 con FEC habilitado	DN100C-2A2(C)F DW100C-2A2(C)F DN100C-2A3(I)F DW100C-2A3(I)F DN100C-2A5(C)F DW100C-2A5(C)F DN50C-2A2(C)F DN50C-2A3(I)F DN50C-2A5(C)F	DN100U-2A2(C)F DN100U-2A3(L)F DN100U-2A5(C)F DN50U-2A2(C)F DN50U-2A3(L)F DN50U-2A5(C)F
OTL4.4-SC o FOIC1.4-SC (100G)		DN50U-8A2(C)F DN50U-8A3(L)F DN50U-8A5(C)F DN100U-8A2(C)F DN100U-8A3(L)F DN100U-8A5(C)F DW50U-8A2(C)F DW50U-8A3(I)F DW50U-8A5(C)F DW100U-8A2(C)F DW100U-8A3(I)F DW100U-8A5(C)F

Tabla 8 – Códigos de aplicación para interconexión DWDM.

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

En la tabla anterior se muestra diferentes tipos de códigos de aplicación posibles en redes DWDM nativas.

Compatibilidad Transversal:

La recomendación ITU-T G.698.2 especifica los parámetros para que la compatibilidad permita una interoperabilidad transversal, esto significa que en los puntos de referencia monocanal Ss y Rs se puede tener señales lambda alien Tx λ_1 y Rx λ_1 de diferentes proveedores.

Para asegurar la compatibilidad de las señales lambda alien Tx λ_1 y Rx λ_1 , se debe asegurar la interoperabilidad en las interfaces Ss y Rs utilizando el mismo código de aplicación. En caso de que el dominio nativo tenga varias interfaces que se comparten con más de un dominio LA, es decir varias señales tributarias LA coexistiendo con los mismos o diferentes códigos de aplicación, deben ser analizados con un enfoque de ingeniería conjunta. En un escenario así, se debe tener precaución con los parámetros de interoperabilidad críticos, ya que la coexistencia de la red nativa con varios códigos de aplicación debe tener consistencia, por ejemplo, la potencia de entrada en las interfaces Rs y la potencia de salida Ss.

5.2.3.2 Parámetros de interconexión Lambda Alien.

Para el estudio de la interconexión e interoperabilidad en las interfaces Ss y Rs de los escenarios de interconexión LA, debemos utilizar parámetros específicos que permitan asegurar la interoperabilidad en la capa óptica de la solución LA.

Los parámetros que se toman en cuenta están divididos en 4 grupos:

- Información General.
- Interfaz de punto de referencia Ss.
- Ruta de transporte óptico desde los puntos de referencia Ss a Rs.
- Interfaz de punto de referencia Rs.

Describiremos los parámetros de cada grupo a continuación, es importante remarcar que muchos de los parámetros fueron ya abordados en los capítulos anteriores y otros parámetros son nuevos, pero que en conjunto conforman las especificaciones asociadas para cada código de aplicación posible en la interconexión de las señales LA en la capa óptica entre dominios LA.

Parámetros de información General:

1. *Separación Mínima de Canales*: El espaciamiento entre canales en GHz, valores comunes son 100GHz, 50GHz.
2. *Bit Rate/Código de Línea*: Clase de señal tributaria óptica.
3. *Máximo BER Aceptable*: Bit error ratio en relación con un objetivo de Diseño. El valor de BER debe cumplirse después de la corrección FEC si aplica.
4. *Tipo de Fibra*: Tipos de fibra óptica entre los definidos [UIT-T G.652], [UIT-T G.653] y [UIT- T G.655].

Parámetros en la Interfaz del punto de referencia Ss:

1. *Potencia Media Máxima de Salida*: Potencia máxima del canal óptico en el punto de referencia Ss en dB, potencia del dominio LA hacia el dominio nativo.
2. *Potencia Media Mínima de Salida*: Potencia mínima del canal óptico en el punto de referencia Ss en dB, potencia del dominio LA hacia el dominio nativo.
 - La potencia mínima y máxima no son valores que se deben cumplir en la implementación, sino en la práctica la potencia media real del canal inyectado no debe exceder los límites definidos entre el mínimo y máximo, pero pueden operar entre esos límites.
3. *Frecuencia Central Mínima*: La Frecuencia central mínima es la frecuencia nominal del canal/señal LA/ λ donde el código de línea modula la información y es entregada al dominio nativo. Se basan en la recomendación de la grilla de canales en las bandas DWDM ITU-T G.694.1.
4. *Frecuencia Central Máxima*: Frecuencia central máxima es la frecuencia nominal del canal/señal LA/ λ .
 - La frecuencia central nominal del canal dentro de la aplicación debe ser mayor o igual a la frecuencia central mínima y menores o iguales a la frecuencia central máxima.
5. *Máxima Excursión Espectral*: Es la diferencia máxima aceptable entre la frecuencia central nominal del canal y el alejamiento de la frecuencia central nominal del espectro

del transmisor medido en el punto de referencia Ss para señales con modulación determinada.

- Para señales con modulación NRZ (no retorno a cero) la diferencia en la frecuencia nominal central medida en el punto de referencia Ss es aceptable hasta -15dB en un ancho de banda nominal de 0,01 nm. En la figura 16.2 se muestra la excursión espectral para NRZ.

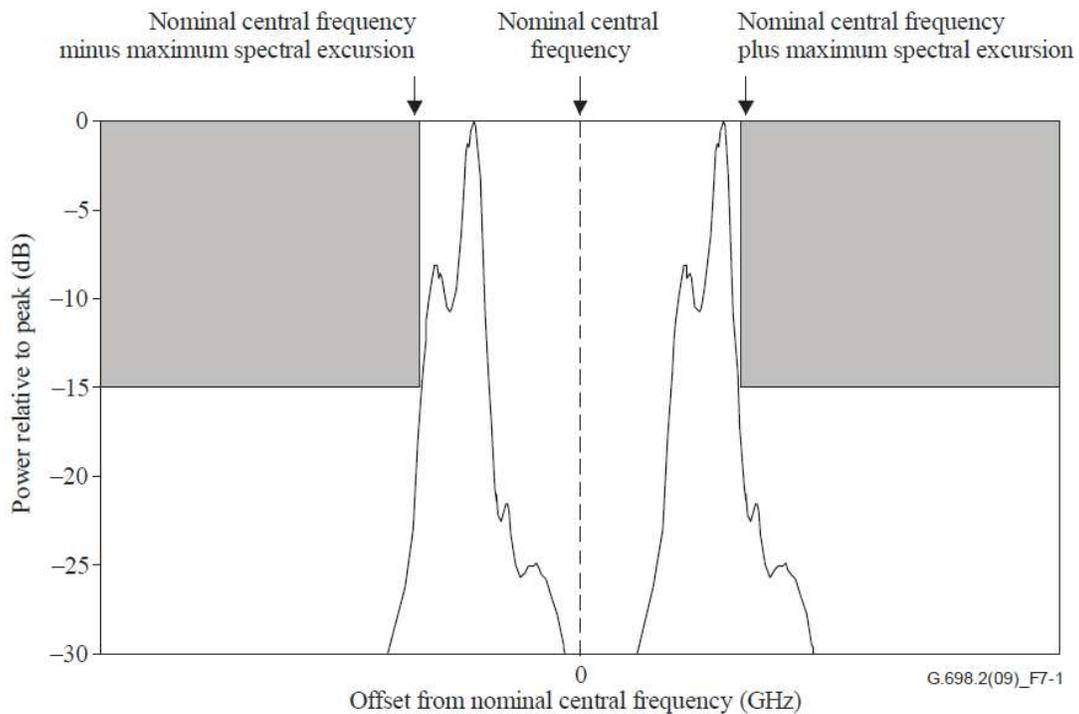


Figura 16.2 – Excursión espectral máxima para señales NRZ.

Fuente: Recomendación ITU-T G.698.2.

- Para señales con modulación más complejas la excursión máxima aceptable es menor, para una señal con modulación DP-DQPSK [35] la diferencia en la frecuencia nominal central medida en el punto de referencia Ss es aceptable hasta -2,5dB. En la figura 16.3 se muestra la excursión espectral para esta señal.

6. *Relación mínima de supresión del modo lateral:* Es el valor mínimo de la relación entre el pico más grande del espectro total del transmisor y el segundo pico más grande. Se expresa en dB, el segundo pico más grande puede estar al lado del pico principal o

alejado. Este valor es evaluado por el dueño del dominio nativo, ya que es el que tiene la posibilidad de realizar las mediciones de todo el espectro asignado.

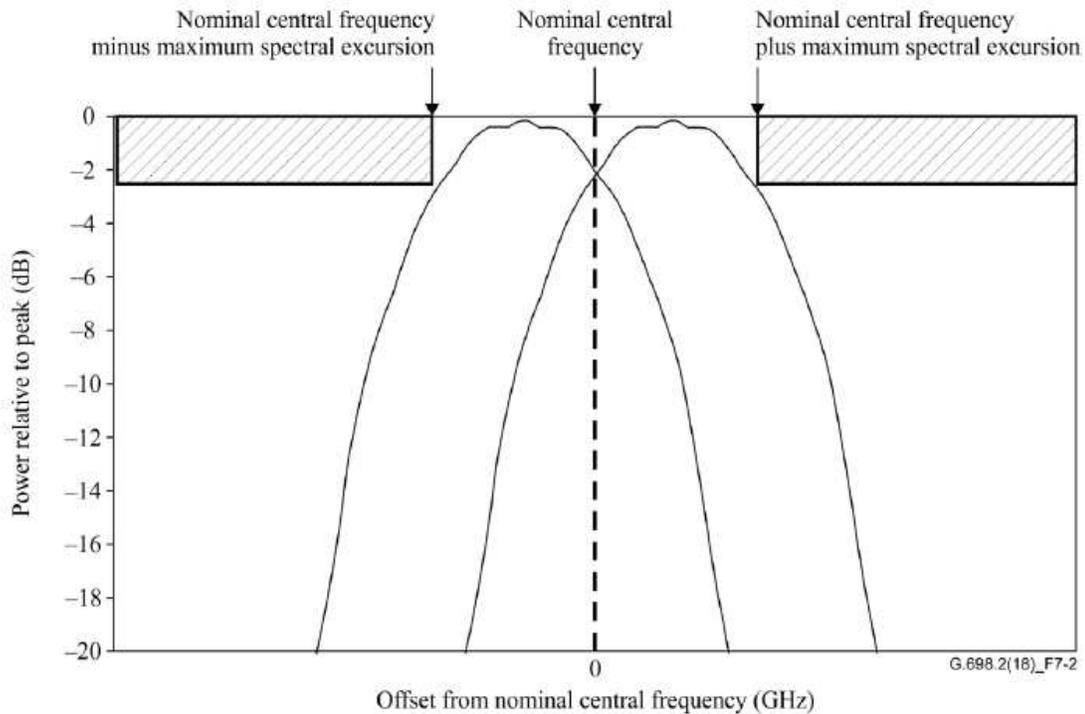


Figura 16.3 – Excursión espectral máxima para señal DP-DQPSK.

Fuente: Recomendación ITU-T G.698.2.

7. *Máximo Ancho de Línea del Láser:* El ancho de línea del láser se define como: El nivel del componente de ruido blanco de la densidad del espectro de potencia de la frecuencia del láser instantáneo multiplicado por π (Pi). Este valor está dado en dB.
8. *Máximo offset entre la portadora y la frecuencia central nominal:* Este valor está en GHz y es el valor máximo de desplazamiento entre la portadora LA y la frecuencia central nominal asignada, específicamente es la diferencia entre el centroide del espectro de potencia de la señal óptica y la frecuencia central nominal del canal. Este valor está dado en GHz y es pequeño.
9. *Diferencia máxima de potencia entre polarizaciones:* La diferencia entre polarizaciones ΔP_{pol} se define como el valor absoluto de la relación de potencias óptica P_X y P_Y (ambos

modos de polarización) en el punto de referencia Ss, su valor es dado en dB y menor a 1,5 dB:

$$\Delta P_{pol} = \text{abs} (10 \cdot \log_{10} (P_X / P_Y)) \quad (5.2)$$

Donde P_X y P_Y son las potencias de las dos polarizaciones nominalmente ortogonales que transportan los dos flujos de datos.

10. *Máximo sesgo entre dos polarizaciones*: Está definido como el tiempo de retardo entre las secuencias de símbolos de cada polarización en el punto de referencia Ss, cuando en ambas polarizaciones se está aplicando la misma secuencia. Es un valor muy pequeño en picosegundos ps.

11. *Máximo error del vector de Magnitud*: EVM (Error Vector Magnitude) un parámetro de medición del performance de un transmisor o receptor, es un concepto utilizado en transmisión digital rescatado para medir performance en redes ópticas con modulaciones complejas arriba de 40G. Se define como:

- En función de N muestras pares de fase (I) y cuadratura (Q) que son adquiridas para cada una de las dos polarizaciones después de pasar un filtro pasa bajo de cuarto orden con un ancho de banda de -3 dB de 0,7 veces la tasa de símbolos, la ecuación para calcular el EVM como valor eficaz o valor cuadrático medio RMS (root mean square) es:

$$EVM_{RMS} = \sqrt{0,5(EVM_{RMS,x}^2 + EVM_{RMS,y}^2)} \times 100\% \quad (5.3)$$

- La medición de EVM es una métrica para señales que tiene modulaciones complejas y en el caso de LA aplica esta métrica, ya que como se recomendó se debe considerar la solución LA para capacidades arriba de 40G con modulaciones complejas. Los valores EVM se expresan en % y se representan también como la raíz cuadrada de la relación de diferencia de potencia de la señal errada con referencia a la potencia nominal y la potencia nominal:

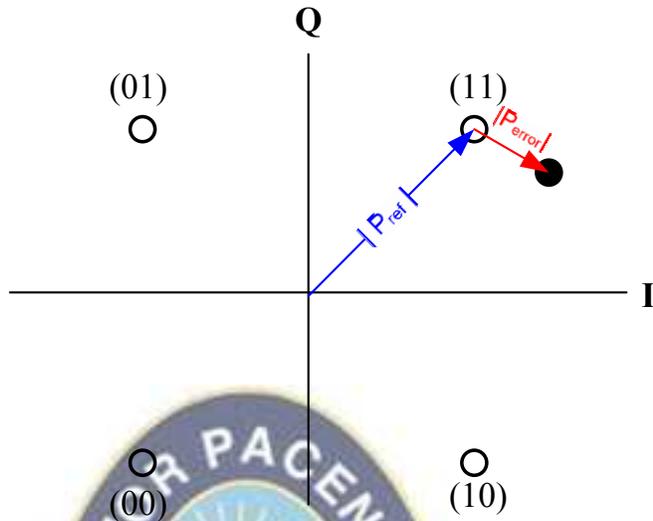


Figura 16.4 – Relación de métrica EVM para una constelación.

Fuente: Test Happens "Performance Considerations for Optical Modulation Analysis", [42]

- En la gráfica anterior se puede ver el diagrama de una constelación representada con P_{REF} y el vector de error P_{ERROR} , el valor para una polarización se puede calcular según:

$$EVM\% = \sqrt{\frac{|P_{error}|}{|P_{ref}|}} \times 100 (\%) \quad (5.4)$$

- En la práctica este parámetro EVM se calcula por cada canal single-carrier y puede ser medido con el equipo analizador de espectro óptico, aunque no define un parámetro de interacción con el dominio nativo, se asegura que la señal enviada cumple con la mínima variación de potencia aceptable en la red [42].

12. *Maximo Offset de IQ*: El desplazamiento IQ de una señal modulada tiene relación con la amplitud de señal promedio en las fases I y Q, el exceso relativo de potencia (no modulado) es un deterioro y se obtiene con una medición, se obtiene a partir de los parámetros I_{medio} y Q_{medio} y la potencia de la señal, que son resultados intermedios en la métrica de EVM. Este valor está en dB mayores a -25 dB.

Parámetros de la ruta de transporte óptico del punto Ss a Rs:

1. *Ondulación Máxima*: La ondulación o rizo de una señal DWDM se define como la perdida de inserción de pico a pico en los extremos de una frecuencia de canal se define dentro de la recomendación ITU-T G.671, para el caso de LA este valor aplicaría a la señal

proveniente del dominio LA y la parametrización define el valor máximo aceptable para las señales LA, para todo canal óptico, sería la diferencia de la frecuencia central del canal y los extremos de la máxima excursión espectral como se muestra en la figura 16.5. Este valor esta dado en dB.

2. *Dispersión cromática Máxima y Mínima (Residual)*: Estos parámetros definen el valor máximo y mínimo de la dispersión cromática de extremo a extremo de la ruta de transporte óptico entre Ss y Rs que la capa óptica del dominio nativo puede tolerar, son valores de dispersión residual en los casos que el enlace DWDM nativo tiene compensadores DCM y son los umbrales de dispersión cromática máximo y mínimo cuando no tiene DCM, los valores se especifican en ps/nm igual que el valor de dispersión cromática.
3. *Perdida mínima de retorno óptico en Ss*: Se refiere a la reflectancia causada por cambios de índice de refracción al largo de la ruta de transporte óptico entre Ss y Rs, el valor debe ser controlado ya que si no sintoniza puede causar degradaciones en el rendimiento del enlace óptico y ruido interferométrico (interferencia de ondas de luz) en el receptor, su valor está en dB, se debe controlar la reflectancia en:
 - Perdida de retorno óptico mínimo en el punto de referencia Ss entre dominio LA y nativo. Puede ser medido con un equipo OTDR (Optical Time Domain Reflectometer).
 - La reflectancia discreta máxima (a través de toda la ruta de transporte óptico) entre los puntos de referencia Ss y Rs.
4. *Máxima Reflectancia discreta entre Ss y Rs*: La reflectancia óptica se define como la relación entre potencia óptica reflejada presente en un punto y la potencia óptica incidente en el mismo punto. Los métodos de control y medición están indicados en la recomendación ITU-T G.957, se debe considerar el número de conectores u otros puntos de reflexión discretos dentro de la ruta de transporte óptico, su valor esta dado en dB y en algún caso se puede llegar hasta una optimización. Este parámetro se puede medir con un OTDR para verificar los puntos a lo largo de la ruta entre Ss y Rs, esta comprobación es requerida en caso de requerir una mejora de todas las lambdas en la capa óptica de dominio nativo y seria también responsabilidad del dominio nativo.

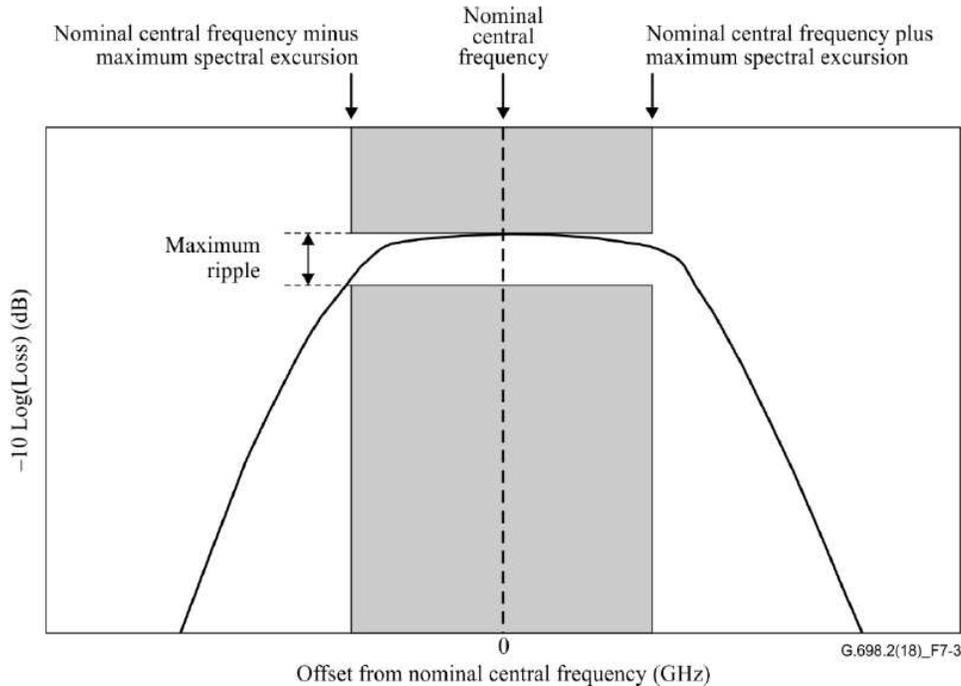


Figura 16.5 – Máxima ondulación o rizo de señal LA.

Fuente: Recomendación ITU-T G.698.2.

5. *Máximo Retardo diferencial de Grupo:* El retardo diferencial de grupo DGD (Differential group delay) es un parámetro de diferencia de tiempo entre las fracciones de un pulso que se transmite en los estados principales de polarización de una señal óptica, Este parámetro está relacionado con la dispersión por modo de polarización PMD que tiene una naturaleza estadística y la relación entre el DGD máximo - DGD medio que se define probabilísticamente. Para la parametrización de DGD se necesita conocer el valor máximo que el sistema puede tolerar, su valor es dado en picosegundos ps.
6. *Máxima pérdida dependiente de la polarización:* La pérdida dependiente de la polarización PDL (Polarization Dependent Loss) es la diferencia en dB entre los valores máximo y mínimo de la pérdida de inserción del canal desde el punto de referencia S_s a R_s por causa de la variación del estado de polarización sobre todas las variaciones de estados de polarización. El valor está en dB menores a 1,5 dB.
7. *Velocidad Máxima de rotación de Polarización:* La velocidad de rotación de polarización, es la velocidad de rotación en el espacio que alimenta las dos polarizaciones de la señal óptica en el punto de referencia R_s medido en krad/s. Un valor aceptable es 50 krad/s.

8. *Diafonía Máxima entre canales*: Este parámetro es el requisito de aislamiento de un enlace respecto de otro a nivel de capa óptica y dentro del enlace entre los puntos de referencia Ss y Rs, este parámetro asegura que, en las peores condiciones de funcionamiento, la diafonía entre canales adyacentes en cualquier punto de referencia Rs sea menor que el valor máximo de diafonía entre canales. La diafonía es la relación de la potencia total de las señales perturbadoras (los de canales adyacentes e incluso de otros canales) con la potencia del canal de la frecuencia LA asignado. Su valor es en dB.
9. *Diafonía Interferométrica Máxima*: La diafonía Interferométrica es la relación entre la potencia perturbadora y la potencia deseada dentro de un solo canal, la potencia perturbadora sería la potencia que permanecería sin considerar ASE (Amplified Spontaneous Emission - ruido a través de toda la cadena del canal óptico) en el canal, cuando se elimina la señal óptica del canal LA, asegura que el valor en el punto Rs sea menor al valor máximo de diafonía Interferométrica, su valor esta dado en dB.
10. *Penalización OSNR Máxima del trayecto Óptico*: La penalización OSNR en el trayecto óptico se define como la diferencia de los valores más bajos de OSNR:

$$OSNR_{R_s} - OSNR_{S_s} \quad (5.5)$$

Donde:

- OSNR_{Ss} en Ss es el valor OSNR más bajo que cumple con el valor de BER máximo de la aplicación desde un receptor de referencia, esto es en el punto de referencia Ss antes de la transmisión a través del enlace DWDM en la capa óptica del dominio nativo.
- OSNR_{Rs} en Rs es el valor de OSNR más bajo que cumple con el valor BER máximo de la aplicación desde un receptor de referencia, esto es en el punto de referencia Rs después de la transmisión a través del enlace DWDM nativo. Los detalles de un receptor de referencia se definen en la cláusula B.3 de la recomendación ITU-T G959.1

Los efectos que contribuyen en la ruta de transporte óptico para la penalización OSNR son los siguientes:

- Penalización de dispersión (residual) del transmisor para señales con modulación NRZ solamente.
- Efectos no lineales a través de la ruta de transporte óptico entre Ss y Rs.

- Diafonía entre canales.
- Diafonía Interferométrica.
- Reflexiones en la ruta de transporte óptico entre Ss y Rs.
- Perdida dependiente de la polarización.

Este parámetro es importante en la sintonización de la red en la solución lambda alien. Su valor esta dado en dB. Las mediciones de OSNR en la etapa de ecualización son la forma de evaluar el comportamiento de la potencia en los puntos de referencia, aunque estos pueden ser medidos por la etapa de monitoreo de la red DWDM nativa, también debe incluirse instrumentos de medición externos.

Parámetros en la Interface del punto de referencia Rs:

Los parámetros en el punto de referencia Rs tienen gran importancia desde el punto de vista de la solución LA, en este punto se cumple el objetivo de inyectar una señal LA en punto de referencia Ss, atravesar toda la red DWDM de dominio nativo, cumpliendo todos los parámetros requeridos de la ruta de transporte óptico Ss a Rs y entregando una señal LA con la frecuencia asignada al otro extremo del dominio LA. Los parámetros en este punto de referencia son los primeros que deben ser monitoreados para asegurar un servicio fiable desde el punto de vista del dominio LA.

1. *Máxima y Mínima Potencia Media de entrada:* Estos parámetros definen los valores máximos y mínimo de la potencia media recibida en el punto Rs, la potencia media en Rs deben estar entre estos 2 valores y los demás parámetros dentro de sus valores límite, también en este punto es necesario que el receptor alcance el valor de BER máximo especificado según el código de aplicación.

El receptor debe cumplir BER máximo para el transmisor en las peores condiciones de los parámetros siguientes:

- EVM_{RMS} para señales con modulación compleja (Ej.- DP-DQPSK)
- Compensación IQ.
- Perdida de Retorno Óptico en el punto de referencia Ss.

También el receptor debe cumplir BER máximo en las peores condiciones de los parámetros del enlace (ruta de transporte óptico entre Ss y Rs):

- Dispersión (Residual).
- OSNR.
- Penalización OSNR de la ruta de transporte óptico.

En el caso del envejecimiento de la red que es natural por el tiempo de operación de una red DWDM nativa, sus efectos deben ser considerados por el responsable del mantenimiento de la red nativa, se podría añadir valores de fin de vida útil en el peor de los casos, pero no es recomendable que se incluyan parámetros adicionales para el control de este punto en específico, ya que la parametrización de la ruta de transporte óptico entre Ss y Rs viene dada por el dueño del dominio LA y este es responsable de su control. Su valor está especificado en dBm.

En la práctica estas condiciones junto con los valores de potencia máxima y mínima del canal, se reflejan en los requisitos de la pérdida (o ganancia) de inserción máxima/mínima del canal en la capa óptica del dominio LA.

Los parámetros especificados para la pérdida de inserción son los valores en el caso más desfavorable, pérdidas de la etapa de multiplexación/demultiplexación, conectores, empalmes, amplificadores ópticos, compensadores DCM, atenuadores ópticos en el caso que sean utilizados y otros dispositivos ópticos entre los puntos de referencia Ss y Rs. Además, debe cubrir cualquier margen adicional referido a:

- Modificaciones futuras de la configuración del cable de fibra óptica como; empalmes adicionales, mayores longitudes de cable y otros.
- Variaciones del rendimiento de la red DWDM nativa debido a factores ambientales.
- Degradaciones en elementos como conectores, amplificadores ópticos, compensadores DCM, atenuadores ópticos y otros dispositivos ópticos entre los puntos de referencia Ss y Rs.

2. *Relación Señal/Ruido Óptico Mínimo (OSNR)*: Es el valor mínimo de la relación entre la potencia de la señal en el canal LA y la densidad de potencia de ruido más alta (referida a 0,1 nm), esto es en el rango de la frecuencia central \pm la máxima excursión espectral. El ruido que se considera es el que estaría presente si la señal del canal LA se eliminaría en la ruta de transporte óptico del enlace DWDM y se mantendría todas las demás condiciones del enlace DWDM nativo, incluyendo ruido de todos los demás canales y amplificadores.

Para aplicaciones de 100Gbps y superiores, la relación señal/ruido óptico mínima $OSNR(f)$ está en función de la frecuencia del canal f y su valor está referido a la frecuencia 193.6 THz, $OSNR_{(193,6)}$, de acuerdo a la siguiente relación:

$$OSNR_{(f)} = OSNR_{(193,6)} - 20 \left(\frac{f}{193,6} \right) \quad [dB] \quad (5.6)$$

Donde:

f : es la frecuencia central en THz.

$OSNR_{(f)}$: es la relación señal/ruido óptico mínima del canal con frecuencia central del canal f en dB (0,1 nm).

$OSNR_{(193,6)}$: es la relación señal/ruido óptico mínima referida a 193,6 THz en dB (0,1 nm).

3. *Tolerancia OSNR del receptor*: La tolerancia OSNR del receptor se define como el valor mínimo de OSNR en el punto R_s que se puede tolerar manteniendo el BER máximo de la aplicación, es decir en el punto de salida del enlace DWDM nativo. Esto debe cumplirse para todo el rango de potencia de entrada entre los valores mínimo y máximo del transmisor, considerando el peor caso de los siguientes parámetros de la ruta de transporte óptica:

- EVM_{RMS} para señales con modulación compleja (Ej.- DP-DQPSK).
- Compensación IQ.
- Pérdida de Retorno Óptico en el punto de referencia S_s .
- Degradaciones en conectores del receptor.

Se debe aclarar que la tolerancia OSNR no tiene que cumplirse en presencia de efectos o pérdidas pertenecientes a la ruta de transporte óptico como; dispersión cromática, efectos

no lineales, reflexión de camino óptico, PMD, diafonía, estos efectos indicados se especificaron en la asignación de la penalización OSNR máxima del trayecto óptico.

Para aplicaciones de 100Gbps y superiores, la tolerancia de la relación señal/ruido óptica del receptor está en función de la frecuencia del canal f y su valor está referido a la frecuencia 193.6 THz, tolerancia $OSNR_{(193,6)}$ del receptor, de acuerdo a la siguiente relación:

$$OSNR_{tolerancia(f)} = OSNR_{tolerancia(193,6)} - 20 \left(\frac{f}{193,6} \right) \quad [dB] \quad (5.7)$$

Donde:

f : es la frecuencia central en THz.

$OSNR_{tolerancia(f)}$: es la tolerancia de relación señal/ruido óptico mínima del canal con frecuencia central del canal f en dB (0,1 nm).

$OSNR_{tolerancia(193,6)}$: es la tolerancia de la relación señal/ruido óptica mínima referida a 193,6 THz en dB (0,1 nm).

Una igualdad útil para comprobación de la ecualización de los niveles OSNR de extremo a extremo es la siguiente:

$$OSNR_{tolerancia(f)_{Rs}} = OSNR_{min(f)_{Rs}} - OSNR_{max_{penalizacion-Ss-Rs}} \quad [dB] \quad (5.8)$$

La tolerancia OSNR del receptor es igual al OSNR mínima en el punto R_s menos la penalización OSNR máxima del trayecto óptico. La medición OSNR en el punto R_s es muy importante para validar este punto pues comprobará el cumplimiento del diseño del comportamiento de la señal LA dentro de la ruta de transporte óptico que interactúa con la capa óptica del dominio nativo.

4. *Reflectancia Máxima del receptor*: Este parámetro está relacionado acerca de las reflexiones del receptor hacia el enlace DWDM nativo, se define un valor de máxima reflectancia permisible del receptor en el punto de referencia R_s . La reflectancia óptica se define como la relación entre potencia óptica reflejada presente en un punto y la potencia óptica incidente en el mismo punto. Es medido con un OTDR.

Aclaración sobre Parámetros en función del tipo modulación de señal LA:

Los parámetros explicados anteriormente están definidos y agrupados específicamente para señales con modulación compleja arriba de 40 Gbps, mejor adecuadas para señales de 100G y son la base para modulaciones complejas que pueden llevar 200G, 400G y 800G sobre una sola portadora. Esto es debido a que para señales de mayor velocidad la modulación requerida no puede ser modulación NRZ y debemos agrupar en dos tipos de señales según la modulación:

- a) Señales con modulación compleja con base 100G: Muy utilizado actualmente por proveedores y fabricantes, recomendado para la solución LA. Todos los parámetros fueron especificados anteriormente.
- b) Señales con modulación NRZ con base 10G: Aunque no es recomendable utilizar la solución LA con señales debajo de 40G por un tema de costos de la solución vs el alquiler de una línea 10G Ethernet que representaría en algunos casos costos menores. La solución LA es posible a nivel técnico con señales 10G (incluye 2.5G y 40G con modulación NRZ) y podría aplicar como un caso particular no excluyente dentro de la solución LA. Para esto debemos considerar solo como referencia 2 parámetros adicionales en la interface de referencia del punto Ss:
 1. *Mascara del diagrama de ojo*: Es una representación de los límites permitidos en la medición del diagrama de ojo, el diagrama de ojo permite analizar el comportamiento de las señales en modulación NRZ/OOK, la máscara define regiones no permitidas para asegurar un diseño óptimo y evitar errores, la definición y los límites de este parámetro se encuentran en la ITU-T G.959.1.
 2. *Penalización OSNR por dispersión máxima (residual) del transmisor*: Es el valor OSNR más bajo en Ss con dispersión (residual) en el peor de los casos y que cumple con el máximo BER de la aplicación, su valor esta dado en dB.

5.2.3.3 Valores recomendados de los parámetros Lambda Alien.

Los parámetros definidos anteriormente son aquellos que se deben revisar de forma conjunta dentro del diseño de la solución LA, actualmente en Bolivia no se encuentran especificados los parámetros de la interconexión de señales DWDM para el intercambio de servicios o interconexiones entre dueño de redes DWDM, esto es que la solución lambda alien no tiene caso de uso en nuestro país. Por esta razón los parámetros especificados son una base para la elaboración de una normativa de interconexión específicamente relacionado a los aspectos técnicos de la oferta del servicio. Aunque todos los parámetros descritos son importantes dentro del intercambio de señales en la capa óptica de transporte, en la práctica y debido a limitaciones de los equipos y tecnología existentes, además de los equipos de mediciones que se disponen actualmente, los parámetros de interconexión pueden ser acordados entre partes y revisados puntos por punto para mejorar la interacción y métodos de control de calidad y la aceptación de servicio respectivamente.

Para el caso de estudio de la solución LA, es necesario especificar los valores recomendados de los parámetros definidos anteriormente, también es importante indicar que los valores de los parámetros esta referidos directamente a los códigos de aplicación que se utilizan, aunque los valores de los parámetros son muy similares, la principal diferencia entre diferentes códigos de aplicación está; en el tipo de modulación utilizada, aquí recodamos que modulaciones avanzadas son más eficientes en sus parámetros y operación a nivel de la capa óptica de transporte.

A continuación se muestran los valores paramétricos de diferentes códigos de línea definidos por valores recomendados, un punto de partida para el uso de la solución LA es a partir de inyectar señales LA de 100Gbps de capacidad con modulación avanzada, por lo cual en la tabla 9, se definen los valores recomendados para los parámetros de interconexión entre el dominio LA y el dominio nativo para señales 100G con espaciamiento de 50 y 100 GHz en aplicaciones de excursión espectral estrecha y la tabla 10, se definen los valores en aplicaciones de excursión espectral amplia.

Parámetro	Unid.	DN50U-8A2(C)F	DN100U-8A2(C)F
		DN50U-8A3(L)F	DN100U-8A3(L)F
		DN50U-8A5(C)F	DN100U-8A5(C)F
Información General		Código de Aplicación	
Espaciamiento mínimo de canales	GHz	50	100
Bit rate /Código de Línea	–	OTU4 - DP-DQPSK 100G	
Máximo BER Aceptable	–	10 ⁻¹²	
Tipo de Fibra	–	G.652, G.653, G.655	
Interfaz en el punto S_s			
Potencia Media Máxima de Salida	dBm	0	
Potencia Media Mínima de Salida	dBm	–5	
Frecuencia central mínima	THz	191.5 C, 186.0 L	
Frecuencia central máxima	THz	196.2 C, 191.5 L	
Máxima excursión espectral	GHz	±15	
Relación mínima de supresión de modo lateral	dB	30	
Ancho máximo de línea láser	kHz	500	
Máximo Offset Portadora y la frecuencia central nominal	GHz	1.8	
Diferencia Máxima de potencia entre polarizaciones	dB	1.5	
Máximo sesgo entre las dos polarizaciones	ps	5	
Máximo error del vector de Magnitud	%	26	
Máximo offset de I-Q	dB	–25	
Ruta de transporte óptico del punto S_s a R_s			
Ondulación Máxima	dB	2.5	
Dispersión cromática Máxima (residual)	ps/nm	10 000	
Dispersión cromática Mínima (residual)	ps/nm	–820	
Pérdida mínima de retorno óptico en S _s	dB	24	
Máxima reflectancia discreta entre S _s y R _s	dB	–27	
Máximo Retardo diferencial de Grupo	ps	50	
Máxima pérdida dependiente de la polarización	dB	2	
Velocidad Máxima de rotación de Polarización	krad/s	50	
Diafonía máxima entre canales	dB	–16	
Diafonía interferométrica máxima	dB	–25	
Penalización OSNR Máxima del trayecto Óptico	dB	5	
Interface at point R_s			
Máxima Potencia Media de entrada	dBm	0	
Mínima Potencia Media de entrada	dBm	–18	
OSNR Mínimo 193.6 (0.1 nm)	dB	21	
Tolerancia OSNR del Receptor 193.6 (0.1 nm)	dB	16	
Reflectancia Máxima del Receptor	dB	–27	

Tabla 9 –Valores de Interconexión LA en señal de 100G Narrow.

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

Parámetro	Unid.	DW50U-8A2(C)F	DW100U-8A2(C)F
		DW50U-8A3(L)F	DW100U-8A3(L)F
		DW50U-8A5(C)F	DW100U-8A5(C)F
Información General		Código de Aplicación	
Espaciamiento mínimo de canales	GHz	50	100
Bit rate /Código de Línea	–	OTU4 - DP-DQPSK 100G	
Máximo BER Aceptable	–	10 ⁻¹²	
Tipo de Fibra	–	G.652, G.653, G.655	
Interfaz en el punto S_s			
Potencia Media Máxima de Salida	dBm	-3	
Potencia Media Mínima de Salida	dBm	-8	
Frecuencia central mínima	THz	191.5 C, 186.0 L	
Frecuencia central máxima	THz	196.2 C, 191.5 L	
Máxima excursión espectral	GHz	±15	
Relación mínima de supresión de modo lateral	dB	30	
Ancho máximo de línea láser	kHz	500	
Máximo Offset Portadora y la frecuencia central nominal	GHz	1.8	
Diferencia Máxima de potencia entre polarizaciones	dB	1.5	
Máximo sesgo entre las dos polarizaciones	ps	5	
Máximo error del vector de Magnitud	%	26	
Máximo offset de I-Q	dB	-25	
Ruta de transporte óptico del punto S_s a R_s			
Ondulación Máxima	dB	2.5	
Dispersión cromática Máxima (residual)	ps/nm	2400	
Dispersión cromática Mínima (residual)	ps/nm	-200	
Pérdida mínima de retorno óptico en S _s	dB	24	
Máxima reflectancia discreta entre S _s y R _s	dB	-27	
Máximo Retardo diferencial de Grupo	ps	20	
Máxima pérdida dependiente de la polarización	dB	1.5	
Velocidad Máxima de rotación de Polarización	krad/s	50	
Diafonía máxima entre canales	dB	-16	
Diafonía interferométrica máxima	dB	-25	
Penalización OSNR Máxima del trayecto Óptico	dB	5	
Interface at point R_s			
Máxima Potencia Media de entrada	dBm	0	
Mínima Potencia Media de entrada	dBm	-18	
OSNR Mínimo 193.6 (0.1 nm)	dB	24	
Tolerancia OSNR del Receptor 193.6 (0.1 nm)	dB	19	
Reflectancia Máxima del Receptor	dB	-27	

Tabla 10 –Valores de Interconexión LA en señal de 100G Wide.

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

Los parámetros anteriores, son valores recomendados que son la base para el diseño de parámetros de interconexión entre dominios de una solución LA, el mismo puede aplicado de mejor forma en todos los casos donde se realiza la interconexión en capa óptica de 2 diferentes redes DWDM, pero también puede ser tomado como referencia y punto de partida para una negociación entre partes para un acuerdo contractual que implique cumplimiento de los parámetros anteriores.

Los valores anteriores son referidos a los códigos de aplicación definidos anteriormente, es importante mencionar que muchos valores para diferentes códigos de aplicación son los mismos, esto puede permitir una interpolación de valores en velocidades superiores con modulaciones similares. De todas formas, aunque todos los parámetros son negociables a nivel de acuerdo contractual en el intercambio e interconexión de señales ópticas, es necesario establecer un punto de partida y llegar a un punto de equilibrio donde ambas partes intervinientes puedan ponerse de acuerdo en base a la posibilidad de demostrar el cumplimiento de los parámetros y valores acordados. Aunque muchos valores son demostrables solamente a nivel de sus parámetros de fabricación son una base importante de revisión en el momento del diseño de la interconexión con LA. La recomendación es cumplir con todos los parámetros y valores recomendados en la tabla 9 en la interconexión LA para asegurar la mejor interoperabilidad de parámetros físicos de capa óptica, sin importar el fabricante y modelos de equipos utilizados.

En la tabla 10 se definen los parámetros y valores para códigos de aplicación de señales de baja capacidad 10G en modulación NRZ de señales con corrección FEC, estos valores son de referencia para este tipo de aplicaciones, en la práctica como se mencionó anteriormente no se recomienda la solución LA para 10G, ya que el costo de la solución y el uso del ancho de banda de un canal DWDM, no justifica para enlaces de baja capacidad como 10G. En la tabla 11 se definen los valores recomendados para los parámetros de interconexión entre el dominio LA y el dominio nativo para señales 10G con corrección FEC espaciamiento de 100 GHz y en la tabla 12 se definen los valores en espaciamiento de 50 GHz, en esta se diferencia con receptores PIN (fotodiodo Intrínseco positivo negativo) y APD (Fotodiodo de avalancha).

Parámetro	Unid.	Código de Aplicación		
		DN100C-2A2(C)F DN100C-2A3(L)F DN100C-2A5(C)F	DW100C-2A2(C)F DW100C-2A3(L)F DW100C-2A5(C)F	DN100U-2A2(C)F DN100U-2A3(L)F DN100U-2A5(C)F
Información General		Código de Aplicación		
Espaciamiento mínimo de canales	GHz	100		
Bit rate /Código de Línea	–	NRZ OTU2 (10G) FEC		
Máximo BER Aceptable	–	10 ⁻¹²		
Tipo de Fibra	–	G.652, G.653, G.655		
Interfaz en el punto S_s				
Potencia Media Máxima de Salida	dBm	6		
Potencia Media Mínima de Salida	dBm	-3		
Frecuencia central mínima	THz	191.5 C, 186.0 L		
Frecuencia central máxima	THz	196.2 C, 191.5 L		
Máxima excursión espectral	GHz	±12.5	±20	±12.5
Relación mínima de supresión de modo lateral	dB	30		
Relación mínima de extinción de canal	dB	8.2		
Máscara de Diagrama de Ojo	–	NRZ 10G G.959.1		
Penalización OSNR por dispersión máxima (residual) del transmisor	dB	2		
Ruta de transporte óptico del punto S_s a R_s				
Ondulación Máxima	dB	2	2	
Dispersión cromática Máxima (residual)	ps/nm	800	3200	
Dispersión cromática Mínima (residual)	ps/nm	-300	0	
Pérdida mínima de retorno óptico en S _s	dB	24	24	
Máxima reflectancia discreta entre S _s y R _s	dB	-27	-27	
Máximo Retardo diferencial de Grupo	ps	30	30	
Diafonía máxima entre canales	dB	-16	-16	
Diafonía interferométrica máxima	dB	-40	-40	
Penalización OSNR Máxima del trayecto Óptico	dB	5	5	
Interface at point R_s				
Máxima Potencia Media de entrada	dBm	0	-8	0
Mínima Potencia Media de entrada	dBm	-14	-20	-14
OSNR Mínimo (0.1 nm)	dB	21		21
Tolerancia OSNR del Receptor (0.1 nm)	dB	16		16
Reflectancia Máxima del Receptor	dB	-27		-27

Tabla 11 – Valores de Interconexión LA 10G con FEC y canal de 100GHz.

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

Parámetro	Unid.	DN50C-2A2(C)F DN50C-2A3(L)F DN50C-2A5(C)F	DN50U-2A5(C)F DN50U-2A2(C)F DN50U-2A3(L)F
		Código de Aplicación	
Información General			
Espaciamiento mínimo de canales	GHz	50	
Bit rate /Código de Línea	–	NRZ OTU2 (10G) FEC	
Máximo BER Aceptable	–	10 ⁻¹²	
Tipo de Fibra	–	G.652, G.653, G.655	
Interfaz en el punto S_s			
Potencia Media Máxima de Salida	dBm	6	
Potencia Media Mínima de Salida	dBm	–3	
Frecuencia central mínima	THz	191.5 C, 186.0 L	
Frecuencia central máxima	THz	196.2 C, 191.5 L	
Máxima excursión espectral	GHz	±12.5	
Relación mínima de supresión de modo lateral	dB	30	
Relación mínima de extinción de canal	dB	8.2	
Máscara de Diagrama de Ojo	–	NRZ 10G G.959.1	
Penalización OSNR por dispersión máxima (residual) del transmisor	dB	2	
Ruta de transporte óptico del punto S_s a R_s			
Ondulación Máxima	dB	2	2
Dispersión cromática Máxima (residual)	ps/nm	800	3200
Dispersión cromática Mínima (residual)	ps/nm	–300	0
Pérdida mínima de retorno óptico en S _s	dB	24	24
Máxima reflectancia discreta entre S _s y R _s	dB	–27	–27
Máximo Retardo diferencial de Grupo	ps	30	30
Diafonía máxima entre canales	dB	–16	–16
Diafonía interferométrica máxima	dB	–40	–40
	dB	5	5
Interface at point R_s			
Máxima Potencia Media de entrada	dBm	0 Receptor PIN –8 Receptor APD	
Mínima Potencia Media de entrada	dBm	–14 Receptor PIN –20 Receptor APD	
OSNR Mínimo (0.1 nm)	dB	21	21
Tolerancia OSNR del Receptor (0.1 nm)	dB	16	16
Reflectancia Máxima del Receptor	dB	–27	–27

Tabla 12 – Valores de Interconexión LA 10G con FEC y canal de 50GHz.

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

5.2.4 Interconexión Lambda Alien en redes legacy DWDM.

Cuando en el dominio nativo tenemos una red DWDM legacy, es decir una red antigua o heredada, debemos considerar sus propiedades más significativas:

- Transmisión de fibra óptica limitado a velocidades menores a 10Gbps.
- No se cuenta con módulos de compensación de dispersión cromática DCM. Porque el efecto no es apreciable en velocidades menores a 10Gbps.
- La velocidad de línea asignado es múltiplos de capacidad 2,5 hasta 10Gbps.
- La relación señal/ruido OSNR en estas velocidades son fácilmente alcanzables.
- La modulación en los transmisores, no requieren de una modulación coherente.
- No son afectados por la distorsión de modo de polarización de pulsos PMD.
- Los efectos no lineales en la red no son de magnitud considerable y son despreciados.
- La planeación y aprovisionamiento de nuevos servicios son complejos.

Las propiedades anteriores son un resumen de algunas características importantes de las primeras redes DWDM, esto es redes implementadas alrededor de los años 1990 al 2000 que aún podrían estar operando como redes heredadas en la actualidad. Sus características en la práctica limitan la velocidad de la red <10Gbps y la distancia máxima posible que se podía alcanzar en la fibra óptica sin amplificadores OLA <80km, estas restricciones son más marcadas en redes de 2.5G de capacidad, que fueron las primeras redes DWDM implementadas como reemplazo a SONET/SDH.

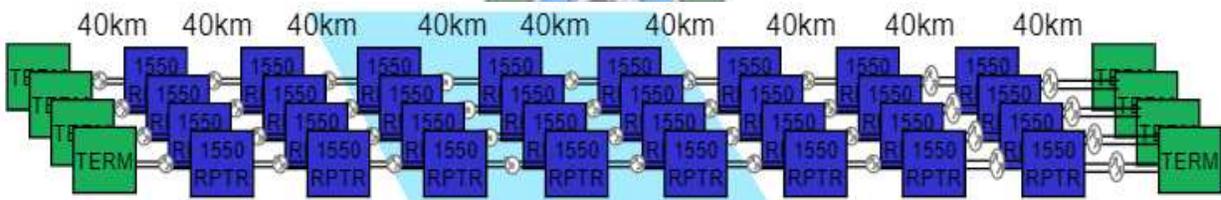


Figura 16.6 – Red DWDM Legacy 2.5G.

Fuente: Tecnologías FiberHome “DWDM” [37]

En la figura 16.6 se muestra una red DWDM 2.5G que opera bajo las características indicadas anteriormente, requiere amplificadores cada 40km y no está optimizadas para velocidades y distancias mayores. Este tipo particular de red DWDM Legacy no soporta lambda alien.

Bajo la misma arquitectura existe un tipo de redes DWDM Legacy que soportan redes con capacidad de 2.5G y 10G, aunque mejoran la velocidad no mejoran las limitaciones indicadas anteriormente por lo cual tampoco lo hacen una alternativa para el diseño de la solución LA. En ambos casos anteriores, se puede concluir lo siguiente:

- No es posible asegurar la interoperabilidad con este tipo de redes DWDM Legacy porque su tecnología es muy antigua para las redes actuales.
- No se recomienda realizar un diseño de solución LA por las limitaciones existentes.
- En algún caso mandatorio que obligue el diseño del dominio LA sobre este tipo de redes, se debería realizar una modernización para vencer limitaciones como la distancia y la velocidad, implementar DCM y otras mejoras en el dominio nativo.

Otro escenario de interconexión con redes legacy a nivel de capa óptica, es posible en redes 2.5G y 10G mejoradas, son redes DWDM que soportan detección coherente, reduciendo los efectos CD/PMD y mejorando la distancia mayor a 80km, poseen módulos DCM que mejoran la modulación arriba de 10Gbps. Es posible lambda alien, sobre una red DWDM de este tipo, ya que es posible enviar una señal OTU4 de 100Gbps, este escenario se muestra en la figura 16.7.

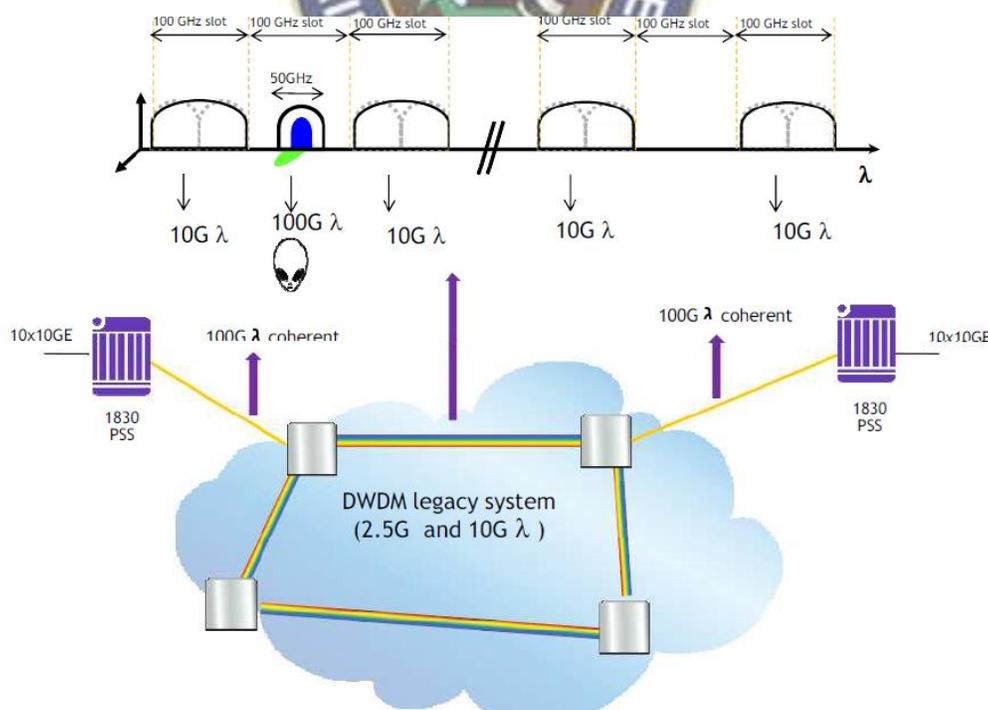


Figura 16.7 – Red DWDM Legacy 10G.

Fuente: Alcatel Lucent “Caracterización para Redes de 40G y 100G”

5.3 Convergencia e interoperabilidad en la capa óptica.

La solución LA y la interconexión a nivel de capa óptica entre diferentes dominios, permite la interoperabilidad de diferentes tecnologías, en este apartado revisaremos la interoperabilidad y las soluciones convergentes para redes DWDM, específicamente en capa óptica y la aplicación de lambda alien.

Los tipos de interoperabilidad para redes DWDM a nivel de capa óptica con la solución LA se pueden clasificar en 2 tipos:

1. Interoperabilidad en redes DWDM de dominio.
2. Interoperabilidad en redes DWDM con soluciones abiertas.

Todos los sistemas indicados en la clasificación del punto 1 son aquellas redes DWDM que fueron diseñadas en un dominio propietario tanto único, esto hace que una gran parte de las redes DWDM actuales y aquellas que se consideran redes DWDM legacy, no tienen un enfoque de interconexión directa entre diferentes redes DWDM con diferentes soluciones de fabricantes.

La segunda clasificación de interoperabilidad, es un tema que aún está en etapa de desarrollo por parte de fabricantes desde 2021 y aun no se tiene estándares específicos para sistemas abiertos (open system), este punto se aborda en el apartado 8.3.

Como se mencionó en el apartado 5.2.4, la interconexión con LA es posible desde redes legacy a partir de enlaces 2.5G y 10G, siempre y cuando las mismas estén con una grilla de canales alineados a la recomendación ITU-T G.694.1, aunque las ventajas en sí de poder interconectar con este tipo de redes DWDM se deben evaluar desde el diseño del dominio LA, no es recomendable por el costo/beneficio para el transporte de señales de 10G en esta solución. Para el caso de redes DWDM de dominio donde es posible la interconexión según lo indicado en el apartado 5.2, la interoperabilidad entre dominios es posible como resultado de las condiciones exitosas en la interconexión de la capa óptica y partiendo desde el código de aplicación.

5.3.1 Convergencia OTN.

La convergencia en redes de telecomunicaciones se define como la capacidad de construcción de redes, sistemas o servicios partiendo o combinándose con otras redes, sistemas o servicios. Por lo tanto, si hablamos específicamente de la convergencia de las redes DWDM a nivel de capa de transporte óptico, podemos decir que la solución lambda alien permite una solución convergente en combinación con la capa óptica de una red DWDM existente. Es decir, la solución LA permite la convergencia de redes DWDM como resultado del diseño, interconexión, interoperabilidad y sintonización entre dominios lambda alien y una red DWDM nativa existente.

Ahora bien, es necesario mencionar que la convergencia es un resultado final, que cualitativamente puede evaluarse como positivo y factible para la solución LA, pero la evaluación cuantitativa de la convergencia debe realizarse como unos de los pasos finales de la aplicación de la solución LA, cuando se hayan sintonizado los parámetros de interconexión, la prueba de certificación de los circuitos a nivel de cliente (puertos Gigabit Ethernet de 10,40, 100Gbps) de extremo a extremo son los más importantes puesto que brindara resultados del performance y comportamiento del tráfico real sobre la solución LA que combina 2 redes DWDM. Es un resultado cuantitativo de la convergencia obtenida en la aplicación de la solución LA. La medición end to end de tráfico de cliente y las pruebas de conmutación que aseguran el correcto funcionamiento de protección topológica de la capa óptica se explican en detalle en el apartado 6.2. Se toma como base que la conmutación de rutas ópticas en caso de fallas que debe ser asumido por el dominio nativo es menor a 50ms (milisegundos).

Dentro de la convergencia cualitativa, como se mencionó la factibilidad es uno de los primeros pasos para el uso de la solución LA, en el caso de redes DWDM, aunque la convergencia de la capa de transporte óptico no se define completamente abierta, a partir de la estandarización de OTN se empieza a mostrar una pequeña luz de lo que será en los siguientes años; las redes ópticas abiertas. Específicamente OTN permite la convergencia de diferentes tipos de tráfico incluyendo Ethernet, IP, SDH y en su capa óptica permite la convergencia con señales alienígenas o lambda aliens como se muestra en la figura siguiente.

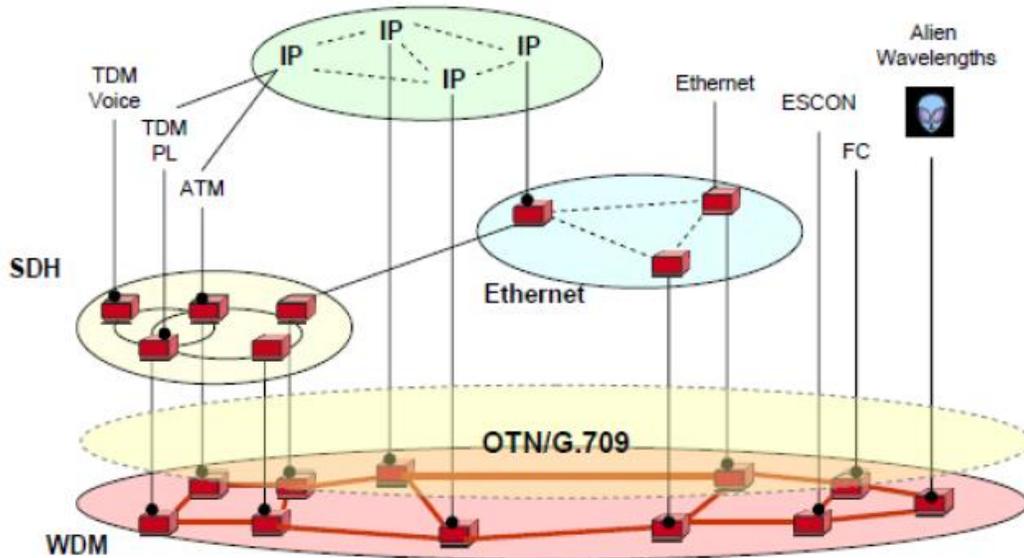


Figura 17 – Convergencia en OTN.

Fuente: CEPETEL “Tecnología DWDM-OTN ITU-T G.709” [43]

Como se puede ver en la figura 17, OTN brinda un primer grado de convergencia en cuanto al manejo de señales de cliente en diferentes formatos (Ethernet, SDH, Fibre Channel FC), pero aun este grado de convergencia no implica la interacción de forma directa con la capa óptica de la red DWDM. El segundo grado de convergencia que ofrece OTN es la interacción directamente con su capa de transporte óptico de señales de tipo IP, FC y señales lambda alien (alien wavelengths), esto significa que es posible la interacción directamente con la capa OMS según la jerarquía OTH (Figura 7), a esto se suma la convergencia de redes de datos donde las señales más importantes son provenientes de redes IP y señales lambda alien. En la figura 18 se muestra la convergencia de servicios en OTN que permite agrupar varios tipos de tráfico.

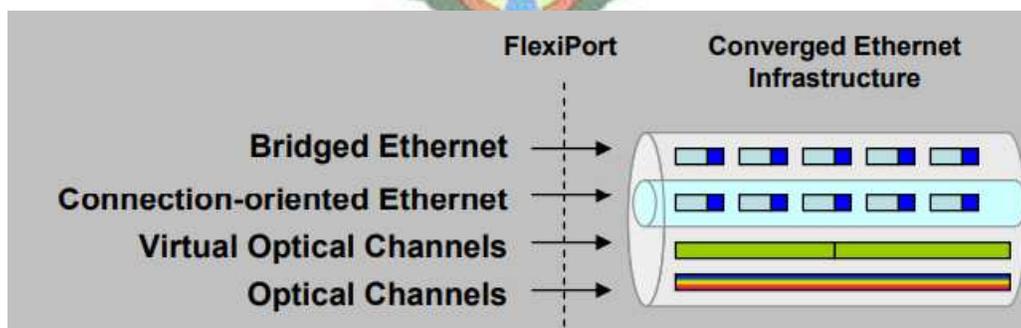


Figura 18 – Convergencia de servicios OTN.

Fuente: https://cudi.edu.mx/primavera_2008/presentaciones/redes_fernando_nunez.pdf “CIENA”

5.4 Tipos de equipos DWDM para Lambda Alien.

La oferta de equipos de diferentes fabricantes para redes DWDM desde el inicio hasta la actualidad ha sido desarrollada mayormente sobre una base de un chasis monolítico y tarjetas de funciones específicas, con monolítico se refiere a que están sobre una sola pieza de chasis principal, para redes DWDM legacy mucho más aun, ya que también se basa en tarjetas fijas, con configuración específica y poca flexibilidad a los cambios. Aunque la mayoría de las soluciones ofrecidas por los fabricantes en la actualidad aún están basados en un chasis monolítico, ofrecen un mayor grado de flexibilidad y menor resistencia a los cambios, incluido la reconfiguración ágil de parámetros importantes.

Podemos clasificar los tipos de soluciones de equipos para una red DWDM en 2 tipos principalmente:

- Solución basada en Chasis Monolítico.
- Solución basada en Equipos Desagregados.

En la figura 19 se muestra un equipo tradicional de solución DWDM basado en un chasis principal y tarjetas, este tipo de solución son para racks estándar de 19” o 23”.

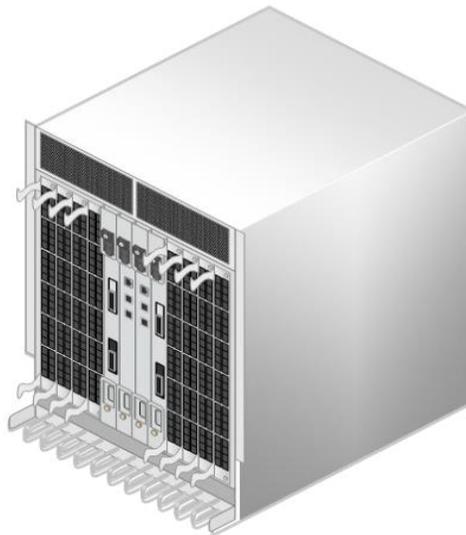


Figura 19 – Equipo DWDM en Chasis Monolítico.

Fuente: SCTE · ISBE “Disaggregated, Coherent DWDM Solution at Shaw’s Newest Cloud Datacentre Interconnect” [45]

En sitio un chasis monolítico DWDM puede ocupar alrededor de la mitad de un rack de 45RU o la cuarta parte, pero mayormente ocupan una gran porción de ella, también utiliza diferentes tarjetas con funciones específicas que son administradas de forma separada por el controlador global del equipo.

En la implementación inicial de un chasis, la solución implementada y las tarjetas requeridas no ocupa el 100% y se hace uso parcial, el gasto en CAPEX de un chasis que no se utilizará en toda su capacidad puede ser significativo y pueden pasar muchos años hasta que el chasis se llene de tarjetas completamente, esta inversión de inicio no es la apropiada, pero los fabricantes los ofrecen comúnmente para bloquear soluciones desagregadas y multi-vendor. En el caso de falla de un componente de una tarjeta, se debe reemplazar toda la tarjeta.

Alternativamente a una solución sobre chasis monolítico, existe la solución de redes DWDM sobre equipos Modulares o desagregados, este tipo de soluciones fueron inicialmente oficializados en su investigación y desarrollo a partir del año 2019 por el proyecto ODTN™ (Open and Disaggregate Transport Network) y en conjunto con el grupo Telecom Infra Project TIP hasta la fecha se tienen avances significativos pero por el otro lado, los operadores que hacen uso de la tecnología DWDM aún no consideran una prioridad la migración a equipos desagregados en la actualidad.

Por el lado de los fabricantes o vendedores, muchos de ellos ya han puesto en el mercado varios equipos y módulos desagregados que denominan cajas blancas ópticas “Optical white box”, que son una opción muy interesante para la construcción de redes DWDM en un modelo desagregado y a futuro abierto, aunque la visibilidad de este tipo de soluciones aún tiene un camino largo para ser normalizado en la redes DWDM y podría llegar a consolidarse en estándar para los operadores en los siguientes 5 a 15 años. En comparación con Open OLS que trabaja en desagregar la capa óptica de transporte DWDM solamente, Open OLS tiene mayor apoyo de operadores y la industria, pues se lo puede considerar como el paso intermedio para llegar a soluciones abiertas. En las páginas siguientes se muestra los equipos disponibles y equipos desagregados que son necesarios para la implementación de la solución lambda alien en la capa de transporte óptico de una red DWDM.

5.4.1 Equipos y tarjetas DWDM para dominio Lambda Alien.

El equipo que realizará la interconexión hacia el dominio nativo debe cumplir con las siguientes características, según el diseño de presupuesto de potencia óptica indicado en el apartado 4.2.1 y diseño de los canales OCh indicado en el apartado 4.2.2:

- Tx/Rx de señal de salida OCh en la grilla de canales DWDM ITU-Grid y que cumple con la frecuencia central del canal λ asignado en el código de aplicación.
- Espaciamiento y ancho de banda en GHz de acuerdo al código de aplicación asignado.
- Capacidad de modificar sus parámetros ópticos referidos a potencia, modulación, ganancia, niveles o umbrales de potencia en transmisión y recepción. Que se ajusten al código de aplicación y los parámetros ópticos de interconexión requeridos.

Por el lado de los servicios que se brindará a nivel cliente en el dominio LA, los equipos deben cumplir con las siguientes características técnicas según el diseño de capacidad en Mbps de la señal portadora indicado en el apartado 4.2.3:

- Transponder con capacidad de la señal portadora lambda alien según diseño; OTUk, que deben cumplir velocidades desde 40Gbps, 100Gbps, 200Gbps, 400Gbps hasta 800Gbps en single-carrier.
- Transponder con capacidad de puertos clientes de acuerdo al diseño de la capacidad total en Mbps y en función de los puertos requeridos, como puertos Gigabit Ethernet 802.3z (1Gbps), 802.3ae (10Gbps) y 802.3bm (40/100Gbps) o puertos SONET.

Por encima de la interconexión en la capa óptica, los detalles propios de la señal como la capacidad de la portadora (OTUk), la modulación utilizada (que puede no ser estandarizada) y la distribución de la capacidad (OTUk) en los puertos clientes, son características propias del dueño del dominio LA y se convierten en la principal ventaja de la solución lambda alien, pues las limitaciones se establecen del lado del dominio LA y no del dueño de la red nativa.

En los apartados siguientes se mostrarán distintos equipos que pueden ser utilizados en el dominio LA de diferentes fabricantes.

5.4.1.1 Modelos de transponders modulares por fabricantes.

Entre los principales fabricantes de equipos DWDM estan; NOKIA (Ex Alcatel-Lucent), CIENA, CISCO, ZTE, HUAWEI. A continuación, se detallan los equipos compatibles con la solución LA.

Equipos NOKIA (Ex Alcatel-Lucent) para Solución Lambda Alien:

Los equipos ofrecidos por NOKIA (Ex Alcatel-Lucent) se pueden considerar uno de los fabricantes más maduros en la tecnología. NOKIA ofrece 4 modelos, desde un chasis básico a uno avanzado. En la tabla 13 se muestra los tipos de chasis que existen en marca NOKIA y la clasificación si son aptos para la solución LA.

Equipo	Marca	Modelo	Especificaciones	Apto para Lambda Alien
Chasis	NOKIA	1830 PSS-4	2 tarjetas - Capacidad 400Gbps	Adecuado
Chasis	NOKIA	1830 PSS-8	4 tarjetas - Capacidad 1,6Tbps	Adecuado
Chasis	NOKIA	1830 PSS-16	8 tarjetas - Capacidad 3,2Tbps	Sobredimensionado
Chasis	NOKIA	1830 PSS-32	16 tarjetas - Capacidad 6,4Tbps	Sobredimensionado

Tabla 13 –Modelos de Chasis DWDM NOKIA para solución Lambda Alien.

Fuente: Elaboración Propia en base a Datasheet DWDM NOKIA “Lightspeed NOKIA 1830 DWDM”.

En los modelos disponibles de chasis DWDM Nokia, existen 2 opciones que pueden ser utilizadas para LA, 1830-PSS-4 y 1830-PSS-8, en la figura 20 se muestran los diferentes modelos de chasis.

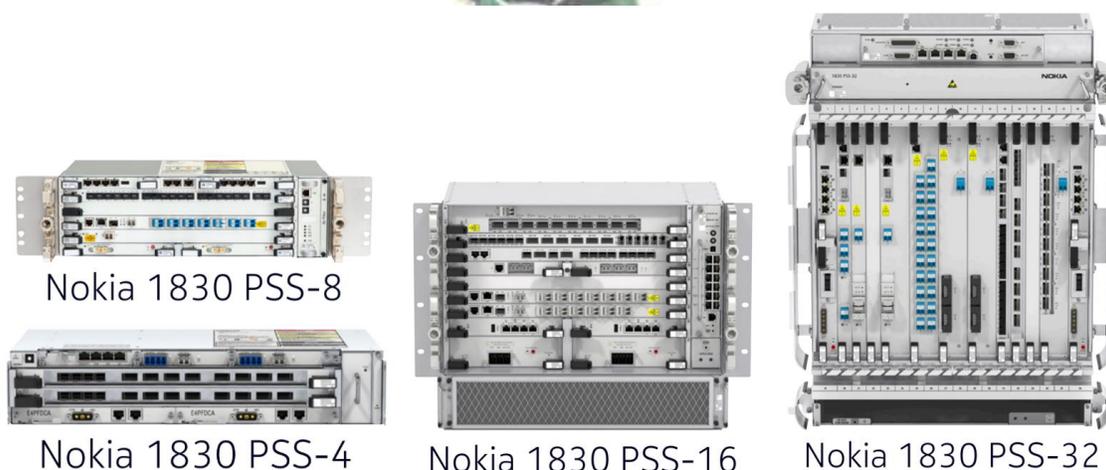


Figura 20 –Modelos Chasis DWDM NOKIA.

Fuente: Datasheet DWDM NOKIA “Lightspeed NOKIA 1830 DWDM”.

Sobre los dos modelos de chasis indicados para LA (PSS-4 y PSS-8), se deben equipar con las tarjetas transponder que interconectarán con la capa de transporte óptico del dominio nativo. Partiendo de capacidades de 40G, que es la capacidad mínima ofrecida por NOKIA, se tiene modelos de 100G, 200G y 500G en single-carrier y dual-carrier. En la tabla 14 se muestran los modelos de tarjetas de transponder disponibles para la solución LA por NOKIA.

Tarjeta	Marca	Modelo	Especificaciones	Chasis Requerido
Transponder	NOKIA	D5X500L (Banda L)	500G (2x200G DP-8QAM) FEC 5x100G Puertos Cliente CFP4 y QSFP28 Puerto Cliente Espaciamiento: 50-62,5-75 GHz. Frecuencia Central: 6,25 GHz step size, 190850 a 186100 GHz. Potencia Tx: -20 a +5 dBm. Potencia Rx: -21 a +2 dBm.	PSS-8
Transponder	NOKIA	130SNX10	100G Single-Carrier OTU4 10x10GEth Puertos Cliente SFP+ Espaciamiento: 50-62,5-75 GHz. Frecuencia Central: 6,25 GHz step size, 196050 GHz a 191300 GHz Potencia Tx: -12 a +3 dBm. Potencia Rx: -21 a +2 dBm.	PSS-4 PSS-8
Transponder	NOKIA	43SCX4E	40G Single-Carrier OTU3 4x10GEth Puertos Cliente Espaciamiento: 50 GHz Frecuencia Central: 196050 GHz a 191700 GHz, in steps of 50 GHz Potencia Tx: -17 a -1,3 dBm. Potencia Rx: -21 a +2 dBm.	PSS-4 PSS-8

Tabla 14 –Modelos de Transponder NOKIA para solución Lambda Alien.

Fuente: Elaboración Propia -Product Information and Planning Guide “1830 Photonic Service Switch 8/16II/16/32”.

Equipos CIENA para Solución Lambda Alien:

Los modelos disponibles de chasis CIENA se encuentran en la tabla siguiente:

Equipo	Marca	Modelo	Capacidad Tarjetas	Apto para Lambda Alien
Chasis	CIENA	6500-D2	2 tarjetas – 2RU	Adecuado
Chasis	CIENA	6500-D7/S8	7 tarjetas	Adecuado
Chasis	CIENA	6500-D14/S14	14 tarjetas	Sobredimensionado
Chasis	CIENA	6500-S32	32 tarjetas	Sobredimensionado

Tabla 15 –Modelos de Chasis CIENA para solución Lambda Alien.

Fuente: Elaboración Propia en base a Folleto de Producto CIENA. “6500 Packet-Optical Platform” [46].

Los modelos adecuados para la solución LA son el chasis CIENA modelo 6500-D2 y 6500-D7/S8, en la figura 21 se muestran los diferentes chasis del proveedor CIENA disponibles:

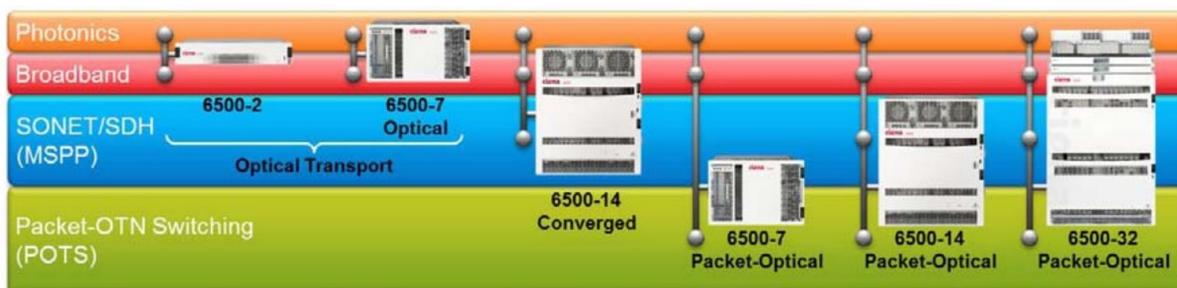


Figura 21 –Modelos Chasis DWDM CIENA.

Fuente: <https://www.ciena.com/products/6500> "6500 Family of Packet Optical Platforms".

CIENA es un pionero en la mejora de capacidad en su tecnología WaveLogic™, que ya en su versión 3 soportaban velocidades de 100G en single-carrier, ahora en su versión 5 soportan velocidades programables de 200G a 800G en single-carrier, en la página de Ciena se puede encontrar información relevante de esta tecnología. En la tabla 16 se muestra un resumen de los parámetros importantes de las transponders CIENA para la solución LA.

Tarjeta	Marca	Modelo	Especificaciones	Chasis Requerido
Transponder	CIENA	40G OCLD	40G (OTU3 Banda C) Single-Carrier	6500-D2/D7
			4x10G Puertos Cliente-40x10G-Card	
			Espaciamiento: 50 GHz. (DP-BPSK)	
			Frecuencia Central: 1527.60 a 1565.50 nm	
			Potencia Tx: Potencia Tx: -11.0 a 0 dBm. Potencia Rx: -25 dBm a +7 dBm	
Transponder	CIENA	100G WL3n MOTR	100G (1x100G) Single-Carrier OTU4	6500-D2/D7
			10x10GEth Puertos Cliente	
			FEC (QPSK100G WaveLogic3)	
			Espaciamiento: 50 GHz. Banda C	
			Frecuencia Central: 1528.77 a 1566.72 nm	
			Potencia Tx: -11.0 dBm a -5 dBm. Potencia Rx: -28 dBm a 0 dBm	
Transponder	CIENA	WaveLogic 5e MOTR	200G-800G Single-Carrier Configurable	6500-D2/D7
			10G, 100G Puertos Cliente	
			Las especificaciones para esta tecnología propietaria de CIENA no son abiertas.	

Tabla 16 –Modelos de transponder CIENA para solución Lambda Alien.

Fuente: elaboración Propia en base a CIENA. 6500. "Broadband, SuperMux, and OTN Flex MOTR Circuits Packs Rel.11.1".

Equipos CISCO para Solución Lambda Alien:

Para el caso de equipos CISCO, se tiene varios tipos de chasis disponibles, pero la serie que se adecua de mejor forma a lo requerido para la solución LA, es la serie NCS (Network Convergence System) 2000 Series, entre ellos los dos modelos principales son el chasis NCS 2002 y NCS 2006, el chasis NCS 2015 es sobredimensionado para la solución LA.

Feature	Cisco NCS 2015	Cisco NCS 2006	Cisco NCS 2002
Service slots	15	6	2
Controller-card slots	2	2	1
Power modules supported	4 (3 + 1 redundancy)	2 (1 + 1 redundancy)	1
Multishelf management	Yes, up to 10 shelves	Yes, up to 50 shelves	-

Tabla 17 –Modelos de chasis CISCO para solución Lambda Alien.

Fuente: CISCO. Datasheet. “Cisco Network Convergence System 2000 Series”.

En la tabla anterior se muestran los 3 modelos de chasis para la serie NCS 2000, la capacidad para NCS2002 es de 400Gbps como máximo y para NCS2006 es de 1.2Gbps máximo.

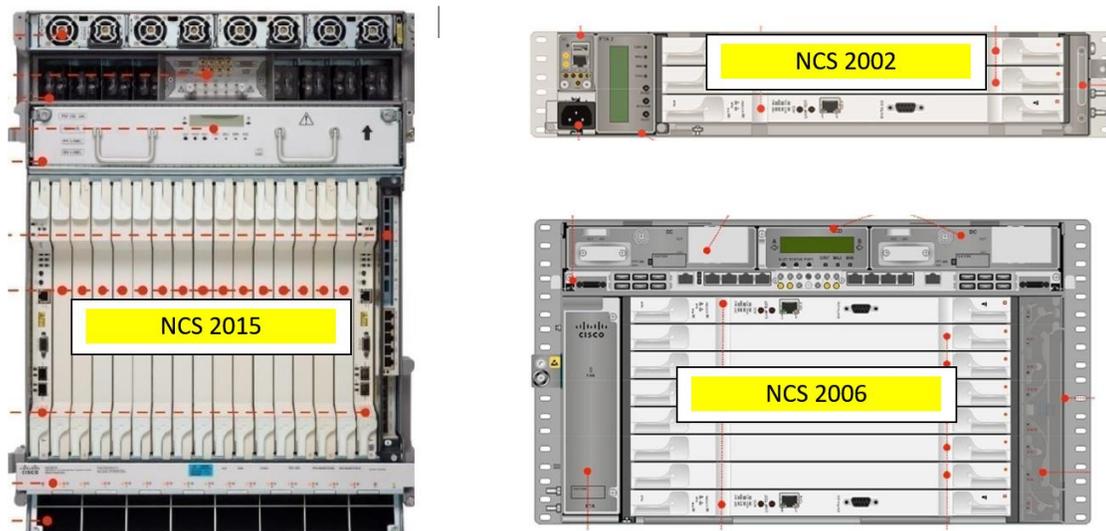


Figura 22 –Modelos Chasis DWDM CISCO.

Fuente: CISCO. Datasheet. “Cisco Network Convergence System 2000 Series”.

En caso de redes metropolitanas (Regional), redes larga distancia (Long Haul LH) y redes ultra larga distancia (ultra long haul ULH), las potencias requeridas son diferentes en la capa óptica y de lado del diseño de la solución, deben ajustarse al nivel de potencia requerido, potencia de transmisión menores a cero (-dBm), se utilizan para redes metropolitanas o de borde, pero

potencias de transmisión mayores a cero (+1dBm) se requieren para redes de larga distancia de hasta 100km-200km, potencias mayores a +3dBm se requieren para enlaces ultra larga distancia (ULH) que tiene distancias de 1000-3000km.

En la tabla 18 se muestra los modelos de transponders CISCO que se adecuan a los valores más utilizados de capacidad, 40G, 100G y 400G, no se considera transponder de 10G, una opción es el modelo NCS 2000 100G Coherente, que permite llevar 100G sobre single-carrier.

Tarjeta	Marca	Modelo	Especificaciones	Chasis Requerido
Transponder	CISCO	ONS 15454 40G (Ultra Larga Distancia) ULH	40G (OTU3 Banda C) Single-Carrier 1x40G Puertos GigabitEthernet Espaciamiento: 50 GHz. (CP-DQPSK) Frecuencia Central: 1529.55 a 1561.83 nm Potencia Tx: Potencia Tx: +1 a +6.5 dBm. Potencia Rx: -8 dBm a -20 dBm	NCS 2002/2006
Transponder	CISCO	NCS 2000 100G Coherent Larga Distancia LH	100G (1x100G) Single-Carrier OTU4 1x100GEth Puerto Cliente CPAK FEC (CP-DQPSK) Espaciamiento: 50 GHz. Banda C Frecuencia Central: 1528.77 a 1566.72 nm Potencia Tx: -1.0 a +1.5 dBm. Potencia Rx: -14 dBm a 0 dBm	NCS 2002/2006
Transponder	CISCO	NCS 2000 400Gbps Xponder (Larga Distancia) LH/ULH	400G (2x200G) Dual-Carrier (CFP2) 4x100GEth Puertos Cliente (QSPF28) FEC (CP-QPSK) Espaciamiento: 50 GHz. Banda C Frecuencia Central: 1528.77 a 1567.13 nm Potencia Tx: LH/ULH Potencia Rx: -14 dBm a 0 dBm	NCS 2002/2006

Tabla 18 –Modelos de Transponder CISCO para solución Lambda Alien.

Fuente: Elaboración Propia en base Transponders y Datasheet disponibles en la página de www.cisco.com

Equipos HUAWEI para Solución Lambda Alien:

En el caso del fabricante HUAWEI, se cuenta con varios modelos de chasis para la solución LA, en función de lo que necesitamos implementar que son específicamente transponders, debemos realizar la elección de chasis de capacidades hasta 6 tarjetas, los modelos disponibles son la serie OSN 1800, cuenta con 3 tipos de chasis que se muestran en la tabla 19.

Specifications	OptiX OSN 1800 I Compact	OptiX OSN 1800 I Enhanced	OptiX OSN 1800 II Compact	OptiX OSN 1800 II Enhanced	OptiX OSN 1800 V
Dimensions (HxWxD)	44x442x220mm	44x442x220mm	88x442x220mm	88x442x220mm	221x442x224mm
Number of Service Slots	3 slots per cabinet (DC) 1 slots per cabinet (AC)	2 slots per cabinet (DC)	7 slots per cabinet (DC) 5 slots per cabinet (AC)	6 slots per cabinet (DC)	15 slots per cabinet (DC) 12 slots per cabinet (AC)
Switching Capability	N/A	120G@128B SDH:30G(high-order) 5G (low-order)	N/A	OTN: 200G ODUk (k=0, 1, 2, 2e, Flex) Packet: 160G@128B SDH: 50G (high-order) 20G (low-order)	OTN: 700G ODUk (k=0, 1, 2, 2e, 3, 4, Flex) Packet: 700G SDH: 280G (high-order), 40G (low-order)

Tabla 19 –Modelos de chasis HUAWEI para solución Lambda Alien.

Fuente: Datasheet <https://carrier.huawei.com/-/media/cnbgv2/download/products/networks/wdm-otn/osn-1800-en.pdf>

Los modelos recomendados son el chasis Optix OSN 1800 I (Enhanced) y el chasis Optix OSN 1800 II (Enhanced), el siguiente modelo OSN 1800 V es sobredimensionado para LA.

Los transponder que se ajustan a las capacidades arriba de 40G se muestran en la tabla 20.

Tarjeta	Marca	Modelo	Especificaciones	Chasis Requerido
Transponder	HUAWEI	TNF1LSC	100G (1x100G) CFP-100G (DWDM) Frecuencia Central: 1529.17 a 1560.61 nm DWDM Sintonizable Espaciamento GHz y Banda según CFP Potencias Tx/Rx según CFP 1x100G Ethernet Puertos Cliente (QSFP28) Potencias configurables según el QSFP28	Optix OSN 1800 I/II
Transponder	HUAWEI	TNF1LDCA	200G CFP C band-ePDM-16QAM DWDM Sintonizable Espaciamento GHz y Banda según CFP Potencias Tx/Rx según CFP 10x10G Puertos Cliente (SFP+) 2x100G Puertos Cliente (QSFP28)	Optix OSN 1800 I/II

Tabla 20 –Modelos de Transponder HUAWEI para solución Lambda Alien.

Fuente: Elaboración Propia en base Transponders y Datasheet Huawei.

Los equipos Huawei, tiene ventaja de ser competitivos respecto a precios comparados con los demás fabricantes, aunque en soluciones completas, pueden brindar soluciones robustas tecnológicamente. En la actualidad este fabricante tiene un gran % de redes implementadas en Latinoamérica principalmente. También Huawei ofrece una gama completa de solución en redes de transporte, además de soluciones sobre redes de acceso 3G, LTE y 5G, redes FTTH y servicios en la nube o cloud computing, convirtiéndolo en un proveedor que ofrece soluciones completas en cuanto a servicios de redes móviles, fijas y transporte en acceso y backbone.

Equipos ZTE para Solución Lambda Alien:

ZTE tiene diferentes tipos de soluciones para redes DWDM, abarca desde redes metro, backhaul y backbone, con diferentes series para cada tipo de aplicación, en el caso de la solución LA requerida, los modelos que se adaptan tanto en tamaño como estabilidad son los modelos mostrados en la tabla 21, específicamente los tipos de chasis de la serie M721 tiene 2 modelos DX61 y DX62 que se adaptan a la configuración de transponders requeridos en LA.

Equipo	Marca	Modelo	Especificaciones	Apto para Lambda Alien
Chasis	ZTE	ZXMP M721 DX61	3 Tarjetas (1RU)	Adecuado
Chasis	ZTE	ZXMP M721 DX62	8 Tarjetas (2RU)	Adecuado
Chasis	ZTE	ZXMP M721 DX66	9 Tarjetas (5U)	Sobredimensionado

Tabla 21 –Modelos de chasis ZTE para solución Lambda Alien.

Fuente: Elaboración Propia en base datasheet "<https://www.router-switch.com/zte-z-mp-m721-d-62-datasheet-pdf.html>"

Los transponder recomendados para ZTE son los siguientes:

Tarjeta	Marca	Modelo	Especificaciones	Chasis Requerido
Transponder	ZTE	MX2	100G OTU4 Line Side DWDM Sintonizable Banda C Frecuencia Central: 192.10 a 196.05 THz Espaciamiento: 50 GHz. (PM-QPSK) Potencia Tx: -5 a +3 dBm. Potencia Rx: 0 dBm a -18 dBm 10x10G Puertos Cliente (SFP+) Puerto Cliente: 10GEth/STM-64/OTU2	ZXMP M721 DX61/DX62
Transponder	ZTE	MQ4/S MQ4/D	200G/400G OTUC4/C2 Line Side DWDM Sintonizable Banda C Frecuencia Central: 191.15 a 196.10 THz Espaciamiento: 62.5/75/100 GHz. Modulacion 16QAM/8QAM/PM-QPSK Potencia Tx: -3 a +2 dBm. Potencia Rx: 0 dBm a -18 dBm Puertos Cliente: 4x100GEth /4xOTU4	ZXMP M721 DX61/DX62

Tabla 22 –Modelos de transponder ZTE para solución Lambda Alien.

Fuente: Elaboración Propia en base datasheet de equipos ZTE [37]

Los equipos DWDM de ZTE tiene una ventaja en cuanto a precios comparados con otros fabricantes, esta ventaja de costos en ZTE es referido solamente arquitecturas de redes DWDM monolíticas basadas en chasis, ya que existen soluciones desagregadas que permiten para la solución LA, tener mejores costos ya que son equipos modulares y compactos, con menores consumos de energía y espacio.

5.4.1.2 Tipos de transceivers DWDM y modelos.

Una alternativa para la solución LA, para señales 100G/200G es mediante transceivers, entre ellas los tipos de transceivers actualmente disponibles son los siguientes:

- CFP: Centum-Form-factor Pluggable, velocidades de 40G/100G, con conectores SC y versiones para fibra monomodo y multimodo. estándares 40GBase-LR4 (10Km), 100GBase-LR4 (10Km) y aplicaciones para DWDM coherentes de 100G OTU4. Tiene diferentes versiones que se ajustan a la potencia requerida para redes metropolitanas, redes larga distancia LH y redes ultra larga distancia ULH.
- CFP2: Es de menor tamaño que CFP y permite integrar una óptica coherente para transmisión de señales DWDM hasta 100G sobre OTU4, el procesamiento digital de señales DSP está en la placa de transponder, otros tienen DSP integrados.
- QSFP28: Transceiver Quad SPF, cuadruplica las señales diferenciadas de alta velocidad, con base a señales de 25-40G, permite llegar hasta 100GEth de capacidad, aunque modula 4 señales, su uso es más para el lado cliente y no para DWDM específicamente ya que utiliza 4 portadoras. Existen variantes de transceiver DWDM que son capaces de modular sobre single-carrier y que pueden conectarse como transceivers QSPF28.
- CFP4: Transceiver más pequeño que CFP2 que permite señales tanto a nivel de cliente 100GEth como señales DWDM 100G/200G en single o dual-carrier en OTU4, OTUC2.
- CFP8: Transceiver que soporta velocidades de 400Gbps sobre Ethernet aplicado para conexiones metropolitanas y de borde, redes backhual y de datacenters hasta 10km, el estándar es 400G CFP8-LR8.

Tiene la ventaja de reponer solamente el módulo y no todo el transponder en caso de fallas, ofrece capacidad de escalamiento dentro de un mismo transponder, además los transceiver permiten la integración en la capa de enrutamiento, es decir conectarse en interfaces compatibles de los routers directamente. En el caso de transceiver CFP y CFP2, los módulos de procesamiento digital de señales DSP se encuentran en el mismo transceiver DCO (Digital Coherent Optics), para CFP2 es posible tener el DSP en el equipo principal ACO (Analog Coherent Optics). En la figura siguiente se muestra los diferentes tipos de transceiver CFP:

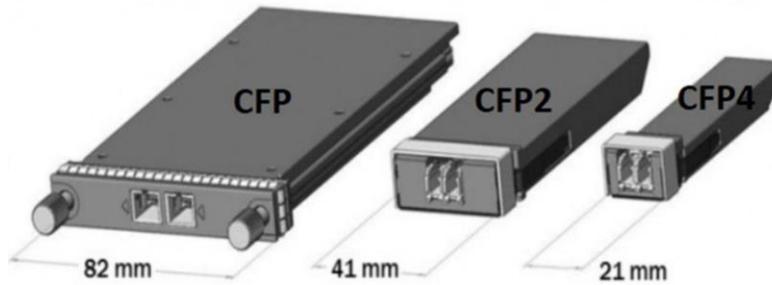


Figura 23 –Tipos y dimensiones de CFP, CFP2 y CFP4.

Fuente: SCTE · ISBE 2019 [45]

Para la aplicación de CFP en lambda alien, debemos considerar que CFP, CFP2 y CFP4 son adecuados para alcanzar velocidades de 100G sobre OTU4 y 200G sobre OTUC2 en single-carrier, en reemplazo de transponder se debe contar con los puertos o tarjetas específicas en los routers que soporten CFP. Para el caso de CFP8 que soporta 400G, este transceiver no se puede utilizar en LA, ya que la multiplexación se realiza sobre 4 portadoras de 100G que son GEth u OTU4, pero tienen 4 portadoras CWDM no sintonizables.

Para el caso de enlaces DWDM de larga distancia (Long Haul LH) y ultra-larga distancia (Ultra Long Haul ULH), necesariamente se deben utilizar transceivers CFP/CFP2, que tienen modulación coherente de señales, requerida necesariamente con compensadores de dispersión cromática DCM y compensación por el modo de polarización PMD. Para este tipo de transceivers es posible llegar hasta distancias mayores a 1000 km. En la figura 24 se muestra diferentes tipos de transceiver respecto de la distancia alcanzable, en amarillo son transceivers tipo SFP+ y QSFP para velocidades 10/40G, en verde 100G sobre QSFP28 y 100G sobre CFP/CFP2 hasta más de 1000 km. La elección del transceiver depende del código de aplicación.



Figura 24 –Modulación en Transceiver DWDM vs Distancia en km.

Fuente: PAM or Coherent <https://www.smartoptics.com/article/100g-dwdm-pluggable-transceivers-pam-4-coherent>

Transceiver Disponibles DWDM para Lambda Alien:

CFP, CFP2:

En el mercado existen diferentes proveedores de transceiver CFP y CFP2 para DWDM, existen diferentes versiones de larga distancia LH y ultra larga distancia ULH, son sintonizables en la frecuencia central de operación y manejan modulación coherente, también manejan espectros de 12.5/50/100GHz que se acoplarían perfectamente al dominio LA en la capa óptica. En la tabla 23 se muestra un resumen de algunos transceivers CFP y CFP2 disponibles en el mercado, aunque existen muchas más opciones de diferentes proveedores que son compatibles con la mayoría de routers del mercado; Cisco, Huawei, Juniper y otros.

Tipo	Marca	Modelo	Especificaciones
Trasnceiver DWDM CFP2-DCO	ProLabs	CFP2-WDM-DET-1HL-C Coherent Long-Haul LH	100/200G (ITU-T Grid Banda C) Single-Carrier Distancia: 80 km Sin Amplificación (OTU4) -FEC Espaciamento: 50 GHz (Modulación: QPSK) Frecuencia Central: 1528.77 -1567.54 nm Sintonizable - Conector Duplex LC Potencia Tx: -15 dBm a +1 dBm. Potencia Rx: -18 dBm a 0 dBm
Trasnceiver DWDM CFP-DCO	SmartOptics	SO-CFP-C-DWDM Coherent Ultra Long-Haul ULH	100 Gigabit (ITU-T Grid Banda C) Single-Carrier Distancia: 2000 km (OTU4) -FEC Espaciamento: 50 GHz (Modulación: DP-QPSK) Frecuencia Central: 191.25 -196.10 THz Sintonizable - Conector Duplex LC Potencia Tx: -15 dBm a +1 dBm. Potencia Rx: -13 dBm a 0 dBm

Tabla 23 –Modelos de transceiver CFP/CFP2 para solución Lambda Alien.

Fuente: Elaboración Propia en base datasheet de la página diferentes proveedores.

Aclarar que actualmente no se encontró modelos CFP4 DWDM, solamente CFP4 con soporte a 100G sobre 4 portadoras no DWDM de 25G, hasta distancias de 40km, para lado cliente.

ProLabs: Fabricante de transceivers compatibles con las marcas de switches y routers CISCO, HUAWEI, JUNIPER. Tienen diferentes capacidades desde 10G hasta 100G, para la solución LA los transceiver compatibles están en la tabla 24. En la figura 24 se muestra el tipo de transceiver DWDM que tiene una forma de tipo QSFP. Es necesario aclarar que la modulación en este tipo de transceiver no es coherente y no está diseñado para largas distancias como lo permite la modulación coherente, aunque en costos puede representar una mejora.

Tipo	Marca	Modelo	Especificaciones
Transceiver DWDM	Prolabs	QSFP-100GB-2WD32-C (Regional)	100 Gigabit (ITU-T Grid Banda C) Single-Carrier Distancia: 80 km Espaciamiento: 100 GHz (2x50G PAM) Frecuencia Central: 1551.72nm CH32 (No sintonizable) - Conector Duplex LC Potencia Tx: -11 dBm a -8 dBm. Potencia Rx: -3 dBm a -2 dBm
Transceiver DWDM	Prolabs	QSFP-100G-DW46-S (Larga Distancia LH)	100 Gigabit (ITU-T Grid Banda C) Single-Carrier Distancia: 80 km Espaciamiento: 100 GHz (1x100G PAM4) FEC Frecuencia Central: 1540.56 nm (No sintonizable) - Conector Duplex LC Potencia Tx: -2 dBm a +2 dBm. Potencia Rx: -8 dBm a +2 dBm.

Tabla 24 – Modelos de transceiver Prolabs QSFP para solución Lambda Alien.

Fuente: Elaboración Propia en base datasheet de la página de Prolabs <https://www.prolabs.com/products/transceivers>

La modulación PAM4 [47] representa una opción de conexión a nivel DWDM que permite conectar a distancias hasta 80 km con la necesidad de compensadores y amplificadores diseñados para esta modulación. Para la solución lambda alien no es recomendable interconectar señales PAM4 con una capa óptica diseñada para señales coherentes en el dominio nativo, se debería interconectar con redes DWDM diseñadas para señales no coherentes.



Figura 25 – Transceiver DWDM en tipo de forma QSFP28.

Fuente: Datasheet de transceivers tipo QSFP28 <https://www.prolabs.com/products/transceivers>

Transceiver 40G y 10G DWDM:

Existen varios modelos de transceiver QSFP que soportan hasta 40G DWDM, los modelos en la tabla 25 muestran algunos modelos utilizables para la solución LA. No es posible el uso de estos transceiver en redes de larga distancia LH y mucho menos en redes ultra larga distancia ULH.

Tipo	Marca	Modelo	Especificaciones
Transceiver DWDM QSFP	Flexoptix	40G QSFP+ DWDM LR FEC	40 Gigabit (ITU-T Grid Banda C) Single-Carrier Distancia: 10 km Espaciamiento: 100 GHz (1x40G PAM4) Frecuencia Central: 1260-1570 nm (Por solicitud) (No sintonizable) - Conector Duplex LC Potencia Tx: -11 dBm a +3 dBm. Potencia Rx: -11 dBm a -3 dBm
Transceiver DWDM SFP+	Edge	DWDM-10G-SFP-40-40	10 Gigabit (ITU-T Grid Banda C) Single-Carrier Distancia: 40 km Espaciamiento: 100 GHz Frecuencia Central: 1545.32 nm (Ch 40) (No sintonizable) - Conector Duplex LC Potencia Tx: -2 dBm a +4 dBm. Potencia Rx: -16 dBm a -1 dBm

Tabla 25 –Modelos de transceiver 10G/40G para solución Lambda Alien.

Fuente: Elaboración Propia en base datasheet proveedores en internet.

5.4.1.3 Transponder desagregados para Lambda Alien.

Una tercera opción de equipos para el dominio LA, es el uso de transponders desagregados y switches ópticos, que son equipos modulares que cumplen la función de convertir la señal óptica DWDM a señales de cliente en diferentes formatos. Estos equipos tienen opciones de operación en óptica coherente y no coherente, con la ventaja que son equipos que no requieren un chasis. En la figura 26 se muestra un transponder típico desagregado.

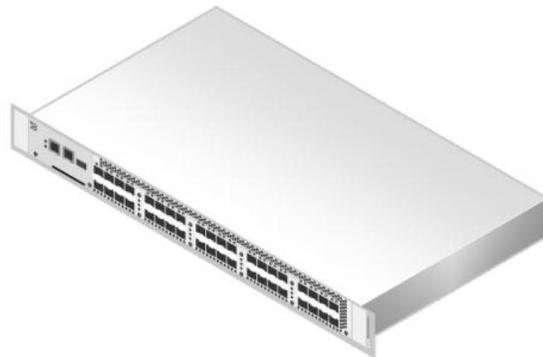


Figura 26 –Transponder Modular/Desagregado DWDM.

Fuente: SCTE · ISBE 2019 [45]

PacketLight™: Es un fabricante de transponder, muxponder que se pueden integrar a redes DWDM nativas para la solución LA. Un equipo que se adapta a la solución LA es el modelo PL-2000M que contiene puertos para cliente SFP+ y QSFP/QSFP8, circuitos de 10GEth hasta

100GEth, llegando a un máximo de 200G, se envían mediante un puerto DWDM tipo CFP2 ACO, sintonizable en varios canales DWDM para larga y ultra larga distancia, con modulación coherente y espaciamiento de 50GHz. En la tabla 26 se muestran las especificaciones del transponder PL-2000M y en la figura 27 se muestra el equipo de 1RU.

Tipo	Marca	Modelo	Detalle	Especificaciones
Transponder / Muxponder	PacketLight	PL-2000M Alcance: Metropolitano Long Haul LH Ultra Long Haul ULH	Puertos Cliente	SFP+: 18x10GEth
			Puertos Cliente	QSFP: 2xQSFP (QSFP+/QSFP28)
			Puertos DWDM	1xCFP2 (ACO)
			Capacidad	100G (OTU4) / 200G (OTUC2)
			Frecuencia Central	DWDM ITU-T G.709 Grid Sintonizable - Ch 13 - Ch 60.5
			Espaciamiento	50 GHz
			Potencia Tx	100G: -2dBm a +3 dBm 200G: -5dBm a 0 dBm
			Potencia Rx y Distancia	200G: -25dBm Up to 1,000Km 18.5dB OSNR 200G: -25dBm Up to 100Km 21dB OSNR 100G: -25dBm Up to 4,000Km 11dB OSNR
			Tipos de Servicio	10G/40G/100G/OTU2-3-4
			Configuración Cliente	<ul style="list-style-type: none"> • 20x 10G (multirate) • 2x 100G clients • 1x 100G + 10x 10G clients • 4x 40G + 4x 10G clients

Tabla 26 –Especificaciones de Transponder PacketLight Modelo PL-2000M.

Fuente: Elaboración Propia en base datasheet <https://www.packetlight.com//images/Data-Sheets/PL-2000M.pdf>

Entre las ventajas principales de este tipo de equipos es el bajo consumo de energía, menor espacio, ya que solo ocupa 1 RU (modular). Un punto adicional en ventaja de este tipo de equipos es que los puertos SFP+ son multiprotocolo, pueden dar soporte a SDH, SONET y Fibre channel.



Figura 27 –Transponder Modular/Desagregado DWDM PacketLight PL-2000M.

Fuente: <https://www.packetlight.com//images/Data-Sheets/PL-2000M.pdf> Datasheet Pagina PacketLight.

Este tipo de equipos es el más recomendable para la solución LA, ya que se pueden ajustar tanto en eficiencia de energía como escalabilidad de red. No ocupan mucho espacio y el mantenimiento es sencillo para grandes capacidades de tráfico.

Edge-Core: Es un fabricante que ofrece soluciones de óptica coherente, los equipos son desagregados/modulares que permiten agregar transceivers para lado cliente, así como transceivers CFP2 para uno o varias lambdas DWDM. Esto lo convierte en un Switch Óptico.

El modelo AS7716-24SC capacidades de 100/200Gigabit Ethernet, cuenta con 16 puertos de 100/200G del tipo QSFP28 para el lado cliente, llegando a una capacidad de 3.2 Terabits. Por el lado óptico cuenta con 8 puertos para transceivers CFP2 de 100G/200G/400G, específicamente CFP2 coherentes tipo DCO. En la tabla 27 se muestran sus características.

Tipo	Marca	Modelo	Detalle	Especificaciones
Transponder	Edge-Core	AS7716-24SC Alcance: Metropolitano Long Haul LH Ultra Long Haul ULH (100GbE Coherent Switch)	Puertos Cliente	QSFP28: 16x100GEth (100G/40G configurable)
			Puertos DWDM	8xCFP2 (DCO) (100G/200G/400G)
			Capacidad	8x100G (OTU4) = 800G 8x200G (OTUC2) = 1.6T 8x400G (OTUC4) = 3.2T
			Frecuencia Central	DWDM ITU-T G.709 Grid Según Modelo CFP2 utilizado (Configurable)
			Espaciamiento	50 GHz/100GHz Según Modelo CFP2 utilizado (Configurable)
			Potencia Tx	Potencia: Metro/LH/ULH Según Modelo CFP2 utilizado (Configurable)
			Potencia Rx	Según Modelo CFP2 utilizado (Configurable)
			Tipos de Servicio	100G/200G Gigabit Ethernet
			Configuración Cliente	• 16x 100G (QSFP28) • 16x 200G (QSFP28) • 16x100G (QSFP28) + 1x 100/200G (CFP2)

Tabla 27 –Especificaciones de Transponder Edge-Core Modelo AS7716-24SC.

Fuente: Elaboración Propia datasheet <https://www.edge-core.com/productsInfo.php?cls=1&cls2=345&cls3=346&id=605>

Este equipo ocupa 1.5RU y es posible que el equipo empiece su operación con la capacidad mínima y a medida que el tráfico va incrementando, la escalabilidad de capacidad se realiza agregando los transceivers que se requieran. La figura 28 muestra el equipo Edge-Core.

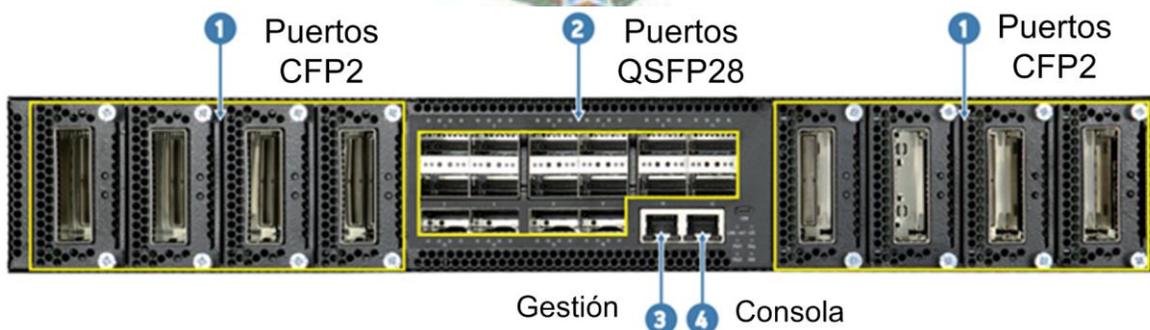


Figura 28 –Transponder Modular/Desagregado Edge-Core Modelo AS7716-24SC.

Fuente: Datasheet Pagina PacketLight <https://www.edge-core.com/productsInfo.php?cls=1&cls2=345&cls3=346&id=605>



CAPÍTULO VI
SINTONIZACIÓN, ECUALIZACION Y GESTION DE
RED EN LAMBDA ALIEN

6. SINTONIZACION, ECUALIZACION Y GESTION DE RED EN LAMBDA ALIEN

La sintonización de la señal LA es el proceso de ajuste de la frecuencia central (nm) y el espaciamiento de canales (Ghz) a los valores asignados por el código de aplicación y la frecuencia central por parte de dominio nativo, esto es debido a que los equipos del dominio LA que se seleccionaron para la interconexión con la capa óptica del dominio nativo, tienen por lo general un rango de frecuencia (nm) a la que trabajan según la ITU-T G.694.1.

6.1 Sintonización de la señal Lambda Alien.

Partiendo del código de aplicación asignado por el dominio nativo. Ej:

Código de Aplicación: **DW100C-8A5(C)F**

El código de aplicación se debe interpretar según las especificaciones del apartado 5.2.3.1, la información del este código de aplicación es la siguiente:

- **D** indica que se trata de una aplicación DWDM.
- **W** indica una excursión espectral amplia.
- **100** indica el espaciamiento de canales es 100 GHz.
- **C** indica que los valores de dispersión cromática son apropiados para un enlace DWDM que tiene compensación de dispersión.
- **8** indica la modulación esperada de la portadora: DP-DQPSK 100G.
- **A** indica que la red nativa tiene amplificadores ópticos.
- **5** indica que la red utilizada fibra ITU-T G.655.
- **(C)** indica que la frecuencia central esta Banda C
- **F** indica que la aplicación requiere FEC como especifica ITU-T G.709.

A la información anterior para la etapa de sintonización, se debe aclarar específicamente cual es la frecuencia central asignada, Ej.- $f=193.100$ (THz) - $\lambda=1552.52$ (nm), equivalente al canal Ch 31 según ITU Grid: C-Band, 100GHz Spacing.

Según la asignación de la frecuencia central y el código de aplicación, debemos verificar que la frecuencia central este dentro del rango permitido en el transponder o transceiver que se utiliza en el dominio LA. Como se mostró en el apartado 5.4, existen varias opciones de equipos para ser utilizados en el dominio LA. Para la sintonización debemos tomar en cuenta los parámetros indicados por el dominio nativo, los parámetros de interconexión que están indicados en el apartado 5.2.3.2, se deben tomar en esta etapa para la sintonización y verificación del offset aceptable de la frecuencia de la portadora y la frecuencia nominal, el offset no debe superar el valor de 1.8GHz. En la tabla 28 se muestra los valores para el ejemplo.

Parámetro	Unid.	DW100C-8A5(C)F
Información General		Código de Aplicación
Espaciamiento mínimo de canales	GHz	100
Bit rate /Código de Línea	-	OTU4 - DP-DQPSK 100G
Interfaz en el punto S_s		
Frecuencia central Nominal	THz	193.100
Frecuencia central mínima	THz	193.0982
Frecuencia central máxima	THz	193.1018
Máximo Offset Portadora y la frecuencia central nominal	GHz	1.8

Tabla 28 –Parámetros de frecuencia central para la sintonización.

Fuente: Elaboración propia en base parámetros recomendados de interconexión ITU-T G.698.2

Los pasos para la sintonización se realizan posterior a la elección de equipos para la interconexión al dominio nativo y la implementación de los mismos de acuerdo a las características de diseño indicadas en el capítulo 4. Para esto se deben realizar los siguientes pasos:

1. Configuración de la señal portadora DWDM del dominio LA según las características del código de aplicación y frecuencia central asignada. Se debe realizar una verificación de la configuración de frecuencia final mediante el gestor de red del dominio LA.
2. Medición de frecuencia central real a la salida del puerto de línea del transponder o transceiver con instrumento de analizador de espectro óptico, el cual confirma que la señal portadora se encuentra en el código de aplicación y frecuencia central de operación, además se puede verificar en este paso la excursión espectral. La sintonización se realiza en el punto de referencia S_s.

6.1.1 Analizador de espectro óptico.

Un analizador de espectro óptico OSA es un instrumento de medición especializado que analiza los parámetros ópticos de señales de dispositivos ópticos como láseres semiconductores y láseres de fibra, los 3 parámetros más importantes que puede medir el OSA son:

- Longitud de Onda de Operación. (nm o THz)
- Nivel de potencia de la señal. (dB)
- Relación Señal a Ruido óptico OSNR.

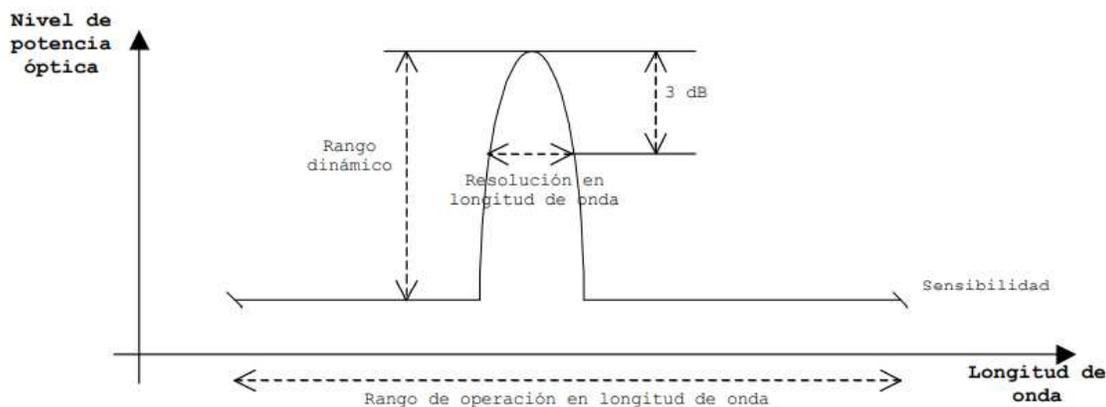
En la figura 29 se muestra una medición característica de equipos OSA, donde se puede apreciar la medición de Potencia en función de la longitud de onda/frecuencia central, la caracterización de la señal óptica está en función de las limitaciones físicas del tipo de equipo OSA, entre ellas las más importantes a tomar en cuenta son:

- Resolución de longitud de onda: Mide el ancho de banda de la señal a 3dB del filtro óptico pasa banda.
- Sensibilidad: El nivel de referencia mínima de potencia óptica que puede detectar.
- Rango de operación en longitud de onda: Especificado por las diferentes bandas definidas por la ITU-T banda O, E, S, C, L, U que son soportadas por el OSA.
- Margen Dinámico: Es el rango de la diferencia entre la mayor y menor potencia que el equipo analizador de espectro puede detectar.

En la figura 31 se muestra un equipo analizador de espectro óptico OSA de la marca EXFO, que es una marca muy reconocida en cuanto a confiabilidad de diferentes mediciones de redes ópticas.

La unión internación de telecomunicaciones ITU-T tiene la recomendación G.697 referido al monitoreo de parámetros ópticos para redes DWDM, en ella se definen algunos parámetros de medición que son realizadas por el instrumento analizador de espectro óptico OSA, aunque no todos los parámetros de mediciones se requieren para la sintonización y ecualización de la

solución lambda alien, muchos de ellos sirven para monitoreo de la operación y mantenimiento de la capa óptica de una red DWDM.



Figura

29 –Parámetros en Medición de Analizador de Espectro Óptico OSA

Fuente: *Analizador Espectro Óptico* http://www.tfo.upm.es/docencia/2007-08/LIBRO_LCOP/Desarrollo_PE1.pdf

En la figura 30 se muestran los puntos de medición con analizador de espectro OSA.

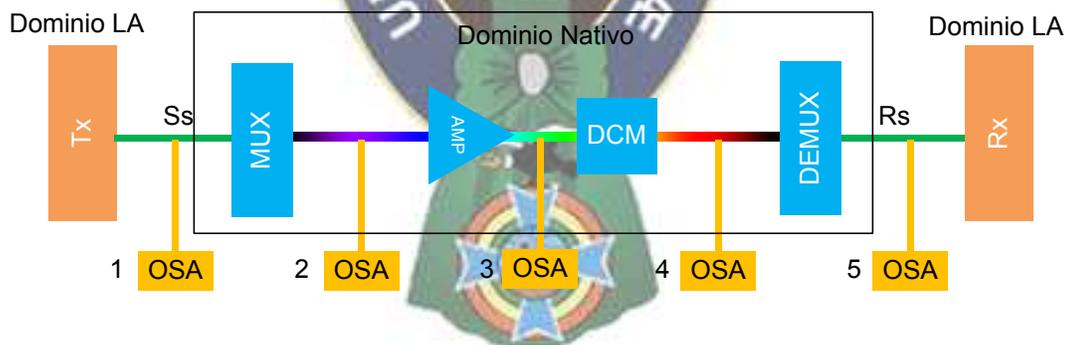


Figura 30 –Puntos de medición posibles con Analizador de Espectro óptico.

Fuente: *Elaboración propia.*

Los parámetros característicos que se determinan con las mediciones son las siguientes:

1. **Densidad Espectral de potencia:** La medición determina la relación entre la potencia en el pico de emisión y el ancho de banda según el filtro óptico sintonizable en el equipo de medición. Además, con un marcador se puede identificar valores de potencia a lo largo de la curva o grafica de cada lambda.

2. **Longitud de onda:** La medición determina la longitud de onda en el pico de la señal óptica, se basa también en el pico producido dentro del espectro de medición.
3. **Ancho de banda a 3dB:** Esta medición define la anchura espectral que es el valor de la señal que se toma en cuenta como la portadora eficaz de la señal óptica.
4. **Pico de amplitud:** Nivel de potencia de la componente espectral en el pico de la señal.
5. **Espaciamiento entre modos o canales:** Se refiere al espaciamiento existente de varias portadoras DWDM en una señal multiplexada.
6. **Número de canales multiplexados:** Cuando las mediciones se realizan en la capa OLS de una red DWDM, se puede medir el número de canales de la señal multiplexada.
7. **Diafonía:** Para la medición la diafonía entre canales, se cuantifica el rechazo en dB que representa la selección de un canal frente al resto.
8. **Reflectividad:** La medición cuantifica el % de luz que se refleja a la longitud de onda de medición, es muy importante dentro de la ecualización de potencias.
9. **Relación de supresión de modo lateral:** Las mediciones cuantifican la diferencia en dB entre el pico más grande del espectro total de la señal multiplexada y el segundo pico.
10. **Four-wave Mixing:** Mediante la gráfica de todas las portadoras, permite identificar la existencia del efecto de la cuarta onda producida por el efecto four-wave mixing. Para la solución LA esto se confirma con los valores de correctos de diafonía entre canales.

En el mercado existen diferentes tipos de equipos de medición del espectro óptico. En la figura 31 se muestra un equipo analizador de espectro de la marca EXFO.



Figura 31 –Equipo Analizador de espectro óptico OSA Exfo.

Fuente: "FTBx-5235" <https://www.exfo.com/es/productos/pruebas-de-redes-de-campo/pruebas-espectrales/ftbx-5235/>

6.1.1.1 Analizador de espectro Pol-Mux:

Para portadoras > 40G que utilizan modulación coherente, se debe utilizar un equipo analizado de espectro óptico denominado Pol-Mux que permite realizar las mediciones en modulaciones avanzadas para redes 40, 100, 200G.

Las mediciones del parámetro OSNR en los sistemas DWDM que contienen señales Pol-Mux, es decir señales coherentes con polarización ortogonal, no pueden realizarse con equipos tradicionales de mediciones OSNR para señales no coherentes de 10G hasta 40G.

Los fabricantes de equipos OSA más conocidos como EXFO y VIAVI han desarrollado métodos de medición que permiten realizar una correlación espectral para diferenciarlos en el dominio de la frecuencia, estos se basan en que los componentes espectrales de las señales ópticas están correlacionados, mientras que los componentes espectrales de ruido no tienen correlación.

En la tabla 29 se muestra el método de medición requerido en función del tipo de modulación que se utiliza en la red, señales coherentes con modulación DP-QPSK/BPSK/16-QAM y otros, requieren instrumentos de mediciones OSA Pol-Mux para una correcta caracterización de los parámetros ópticos. Independientemente del tipo de medidor requerido, los parámetros de medición a caracterizar son los mismos.

DATA RATE	ROADM?	MODULATION FORMAT	OSNR METHOD
≤ 10 Gbit/s	No	OOK	IEC
≤ 10 Gbit/s	Yes	OOK	In-band
40 Gbit/s noncoherent	Yes or no	DQPSK or other	In-band
40 Gbit/s coherent	Yes or no	DP-QPSK, DP-BPSK	Pol-Mux
100 Gbit/s coherent	Yes or no	DP-QPSK	Pol-Mux
200 Gbit/s coherent	Yes or no	DP-16-QAM	Pol-Mux

Tabla 29 –Método de medición OSNR por tipo de modulación.

Fuente: White paper 28- EXFO “40G/100G/200G OSNR Measurements with a Pol-Mux OSA” [48]

6.1.2 Sintonización con analizador de espectro óptico.

La sintonización de frecuencia central en el dominio LA se debe realizar como paso previo para la interconexión con el dominio nativo para la interconexión de la solución LA, aunque las características de la frecuencia central se deben ajustar desde la etapa de diseño con la elección del tipo de tarjeta transponder o transceiver, pasando por la etapa de planeación y configuración de los equipos DWDM.

La verificación de sintonización se realiza con analizador de espectro óptico en el punto de medición 1 (fig.30), incluso antes de la interconexión con el dominio nativo, estas mediciones sirven también para realizar ajustes necesarios en la frecuencia central de operación de la portadora lambda alien. Para el ejemplo indicado de código de aplicación **DW100C-8A5(C)F** y frecuencia central $f=193.100$ (THz) - $\lambda=1552.52$ (nm), en la figura 32 se muestra la medición de la frecuencia central, el cual está en 193.0997 THz con un espaciamiento de 149,8GHz, en la evaluación de la sintonización de esta lambda, la diferencia de la frecuencia central nominal y la frecuencia medida es el valor offset de 0,3GHz, el cual cumple con el valor requerido según la recomendación ITU-T G.982.2 de la tabla 10. Aunque el valor del espaciamiento no es el correcto, ya que el código de aplicación indica 100GHz y en la medición se ve un valor de 149,8GHz, esto se debe ajustar en la etapa de ecualización de la solución LA.

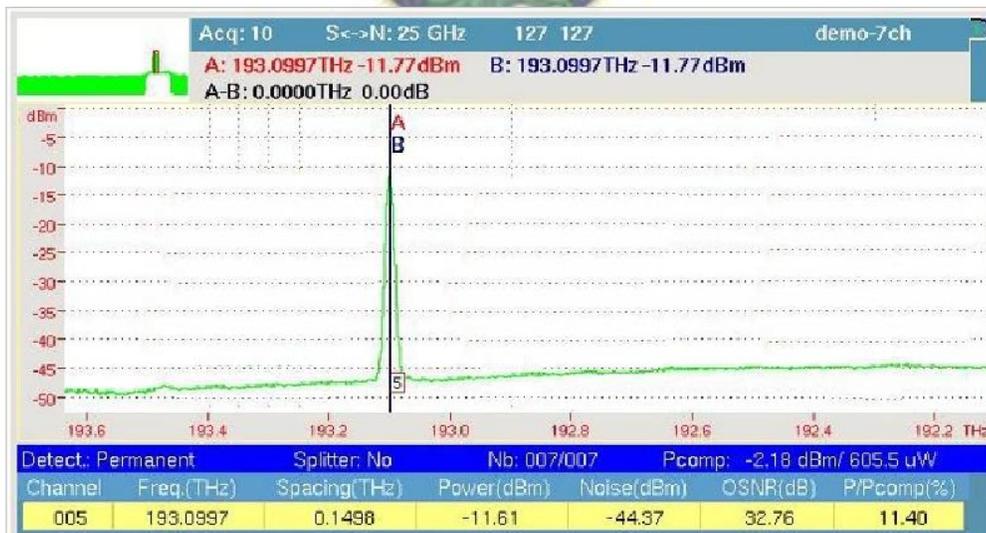


Figura 32 –Medición para sintonización con equipo OSA.

Fuente OSA-110M, PC <https://www.fosshfibreoptics.com/optisk-spektrumsanalysator-osa-110m-pc->

6.2 Ecuación de dominio Lambda Alien.

La ecuación de la solución lambda alien se realiza tomando en cuenta que el dominio nativo tiene un span o rango de potencia en el cual cada puerto o lambda que se interconecta debe estar configurado desde la salida de transponder, los valores recomendados para la interconexión entre dominios deben partir en función del código de aplicación y los parámetros de interconexión indicados por el dominio nativo. Los parámetros de interconexión indicados en el apartado 5.2.3.2 son los que se deben ecualizar entre el dominio LA y el dominio nativo. Para este ajuste de parámetros se puede utilizar los valores indicados en el apartado 5.2.3.3, que son valores recomendados según la ITU-T G.698.2 y en el mejor de los casos como buena práctica de la solución lambda alien, es recomendable que el responsable y dueño del dominio nativo, entregue como parte del acuerdo de interconexión una tabla de especificaciones con la misma estructura que los parámetros de las tablas 9, 10, 11 y 12.

Partiendo de lo indicado en el párrafo anterior, para la ecualización debemos tomar en cuenta los siguientes parámetros, siguiendo el ejemplo de código de aplicación DW100C-8A5(C)F y frecuencia central $f=193.100$ (THz) - $\lambda=1552.52$ (nm):

No.	Parámetro	Unid.	DW100C-8A5(C)F
Interfaz en el punto S_s			
1	Potencia Media Máxima de Salida	dBm	-3
2	Potencia Media Mínima de Salida	dBm	-8
3	Máxima excursión espectral	GHz	±15
Interface at point R_s			
4	Máxima Potencia Media de entrada	dBm	0
5	Mínima Potencia Media de entrada	dBm	-18

Tabla 30 –Parámetros de Potencia para la Ecuación.

Fuente: Elaboración propia en base parámetros recomendados de interconexión ITU-T G.698.2

El parámetro de la lambda alienígena que debemos ecualizar es la potencia de inyección de señal, que debe estar en el margen de ecualización de la red nativa según se indica en la tabla 30 y debe asimilarse sin mucha diferencia con las lambdas nativas. Ya dentro de la portadora alienígena las características de modulación utilizada por el transponder externo es un parámetro que influye en la ecualización de la red nativa por el comportamiento de la potencia

y el espaciamiento que puede utilizar, esto hace que se pueda inyectar señales con doble polarización y modulaciones coherentes PSK y QAM que llegan a velocidades de 100G en redes nativas con lambdas de 10/40G.

6.2.1 Potencia de inyección Lambda Alien.

Considerando que la red DWDM nativa a la que interconectaremos, ya ha pasado en su etapa de implementación por una etapa de ecualización de potencias entre todas las portadoras multi-carrier que transporta, la señal LA es la que debe ajustarse a la red nativa de acuerdo a los parámetros de interconexión requeridos por el código de aplicación asignado por el dominio nativo. Para la ecualización de potencias, se debe realizar la configuración de potencia en el dominio LA, esto está en función de los equipos con que se cuentan en el dominio LA, podrían ser transponder o transceiver, que tiene una salida de la señal óptica DWDM.

Es necesario que en la etapa de configuración se ajuste la potencia requerida en el punto Ss para poder llegar a los niveles umbrales que se necesitan en el punto Rs, considerando todas las pérdidas y ganancias de la ruta óptica que pertenece al dominio nativo, tomando en cuenta que el diseño definió el tipo de equipo que se ajusta al código de aplicación y parámetros de interconexión requeridos. En el caso de la potencia, con la información del diseño de presupuesto óptico indicado en el apartado 4.2.1, es con la cual debemos trabajar para llegar a los parámetros de diseño en la interconexión. Toda esta tarea de ajuste y verificación de los niveles de potencia deben estar dentro de la ecualización.

Los 2 datos importantes que debemos tomar en cuenta del diseño de presupuesto óptico son la potencia en los puntos de referencia Ss y Rs, que en correspondencia serían la potencia de Tx y Rx en el dominio LA, todo el costo de potencia entre estos dos puntos, ya considera las pérdidas en la capa de adaptación y la capa OLS del dominio nativo de extremo a extremo. A continuación, se enumeran los pasos para la etapa de ecualización, la ecualización consta de 5 pasos.

Ecualización-Paso 1: El primer paso de la ecualización es el ajuste de potencia en la configuración del dominio LA (esto está en función de los equipos y software de gestión del

fabricante seleccionado). Cuando las potencias se hayan seteado en el transponder/transceiver, se debe realizar la verificación de la potencia real de transmisión (Ss). En la figura 31 se muestra la interfaz de gestión de una red DWDM (transponder 100G NOKIA), en la cual se puede verificar tanto la potencia de transmisión y recepción. Los valores que se obtienen en la verificación deben estar de acuerdo al cálculo de presupuesto óptico de la solución LA.

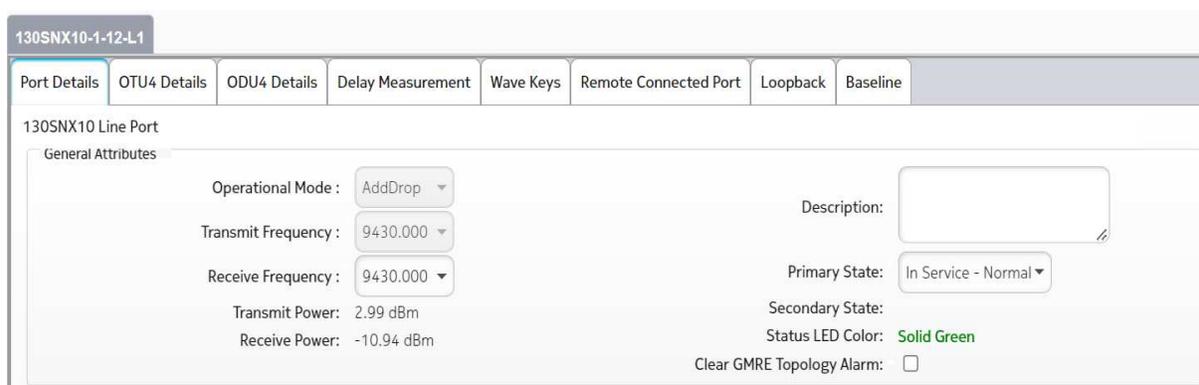


Figura 33 –Verificación de Nivel de potencia Tx y Rx en dominio LA.

Fuente: Relevamiento de configuración de red DWDM de un Operador.

Ecualización–Paso 2: Se debe realizar medición de potencia con analizador de espectro OSA en el punto de medición 1 (fig.30), punto de referencia Ss, la medición de potencia Tx (Ss) se debe realizar antes de la interconexión hacia el dominio nativo, esto asegura que no estaremos fuera de los márgenes de potencia asignados y provocar algún desajuste de potencia en la capa OLS del dominio nativo (tomar en cuenta que omitir este punto puede llegar a provocar un falla en la red del dominio nativo).

En la figura 32 se muestra le medición de una portadora LA en la etapa de sintonización de frecuencia, en el resultado de la medición se muestra también el valor de la potencia de la portadora que se debe tomar en cuenta en este paso, aclarar que para la medición en el punto Ss se debe validar previamente que el equipo OSA pueda tener el rango de potencia que queremos medir (potencias mayores +1 dBm), de otra forma el equipo OSA puede resultar dañado. En el caso de que el equipo OSA no pueda medir nuestra potencia Tx, se debe saltar este paso y realizar la medición de potencia en la capa OLS del dominio nativo.

Los pasos 3, 4, 5 de la etapa de ecualización se explican en los siguientes apartados.

6.2.2 Medición de potencia en dominio nativo.

Con las etapas realizadas correctamente de la sintonización y ecualización hasta el paso 2, ya tenemos una señal alienígena en la frecuencia y potencia asignada por el dominio nativo, entonces es posible realizar la interconexión del dominio LA pasando por la capa de adaptación al puerto asignado por el dominio nativo. Cuando la interconexión se ha realizado, se debe realizar la ecualización en la capa OLS de la red nativa. El paso 3 y 4 de la etapa de ecualización.

Ecualización-Paso 3: Se debe realizar un monitoreo desde la capa OLS en la red nativa del valor de potencia inyectado por la señal alienígena, el monitoreo se debe realizar desde el NMS de dominio nativo y es necesario para validar que estemos llegando al cálculo original del presupuesto óptico de la red nativa. Como ejemplo de la medición que se debe realizar en la figura 34 se muestra el nivel de potencia inyectado por una lambda alienígena en el canal 76 de la red nativa, este valor en comparación con los canales 78 y 80 difieren en el valor de potencia inyectado.

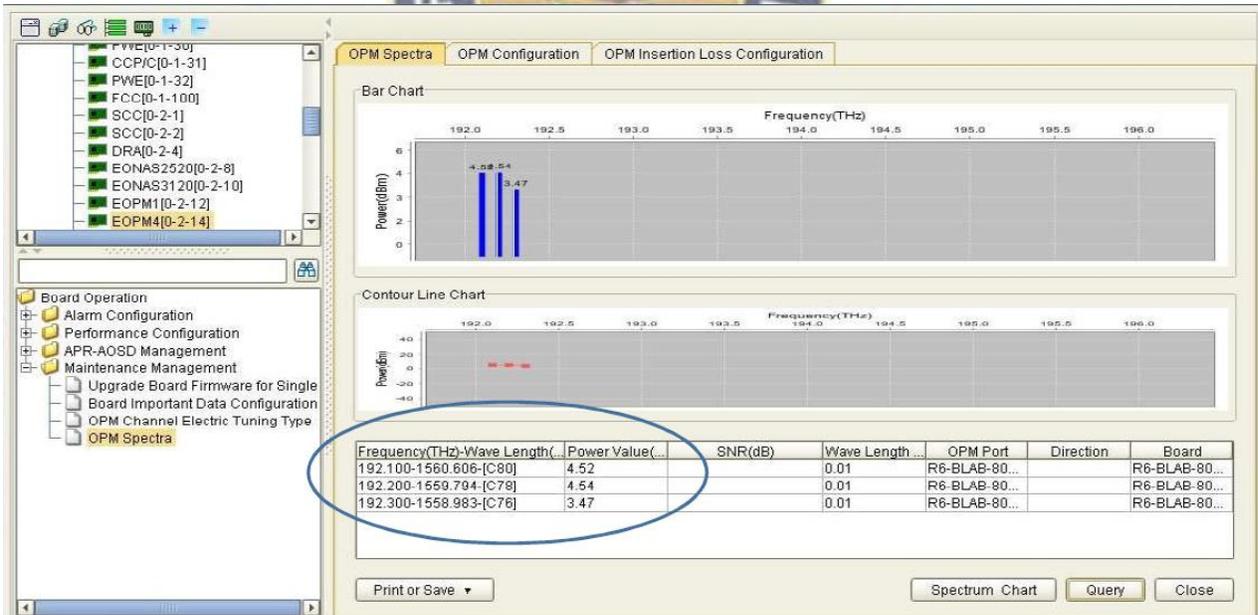


Figura 34 – Medición de potencia óptica en la red nativa.

Fuente: Resultado prueba lambda alien [13].

El valor de potencia del canal 76 es de 3.47 dBm menor a la potencia de las otras portadoras nativas y aunque esto puede parecer un problema de inicio, dependiendo de la configuración

de la red nativa, distancia de enlaces, amplificadores ópticos puede llegar o no a ser un problema para solucionar, esto depende del cumplimiento del diseño de presupuesto óptico, que será quien indica si se debe ajustar o no las potencias de Tx.

En los casos donde la potencia medida en el paso 1 y 2 de la etapa de ecualización difieran significativamente ($>1\text{dB}$) de la potencia medida en el paso 3, es un indicio de una degradación no planificada existente en la capa de adaptación y debe corregirse en esta etapa.

Del ejemplo anterior de forma inicial se puede decir que es necesario el ajuste de potencia de la lambda alienígena Ch76, ya que no tiene el mismo nivel de inyección que las portadoras nativas Ch 78/80, pero si el valor de potencia de la señal LA está en el rango asignado para la interconexión, la capa OLS a nivel de sus amplificadores ópticos en la ruta del dominio nativo también realizan una compensación de ganancia que a la salida (punto de referencia Rs) pueden llegar a entregar un nivel OSNR mayor o igual al nivel aceptable de la señales ópticas, cumpliendo el cálculo de presupuesto óptico.

Ahora bien, en el caso contrario de que tenemos una potencia mayor que las señales nativas para la interconexión con lambda alien, para poder llegar al margen de potencia óptica requerido en el dominio nativo, debemos hacer un ajuste de potencia en el transponder/transceiver, hasta llegar a la potencia normalizada requerida en la red nativa.

Una solución alternativa en casos donde no podamos modificar la potencia en los transponder/transceiver, es utilizar atenuadores ópticos, estos pueden ser atenuadores fijos o regulables que permitan ecualizar la potencia entregada. Potencias altas generalmente provocan efectos no lineales que se traducen en diafonía (crosstalk) entre portadoras.

El objetivo de la ecualización en este punto es llegar a valores OSNR deseados y debe ser verificado en las mediciones OSNR para confirmar que no tengamos afectación entre portadoras nativas y la portadora lambda alien.

Ecualización-Paso 4: La medición de potencia con analizador de espectro OSA en el dominio nativo, es necesario para verificar el comportamiento de las señales multiplexadas (señales nativas + señal LA), la medición debe realizarse en la capa OLS del dominio nativo a la salida

del multiplexor en el punto de medición 2 (fig.30) , la medición debe verificar que las potencia y la perdida por multiplexación sean las mismas para todas las señales multiplexadas, un ajuste puede realizarse en esta etapa en la potencia de la señal LA para compensar alguna degradación por la capa de multiplexación de la red nativa. La segunda medición de potencia con equipo OSA de todas las señales multiplexadas se debe realizar a la llegada al demultiplexor en el punto de medición 4 (fig.30), ya en este punto, contienen el trabajo de la ruta óptica OLS, es decir, señales amplificadas, compensadas 3R (Regeneración/ Recuperación/ Resincronización).

Debido a la interconexión de una señal externa (portadora LA) a la red nativa, puede producirse un desajuste de potencias en general a toda la ruta óptica, por lo cual la medición en este punto confirmará la necesidad de algún ajuste de potencia tanto en la señal LA para lograr alcanzar el ajuste del presupuesto óptico, como en los amplificadores de la capa OLS del dominio óptico, también permite comprobar que no existan efectos no lineales sobre estimulados en la red que degeneren en las señales demultiplexadas. En la figura 35 se muestra la medición de varias portadoras.

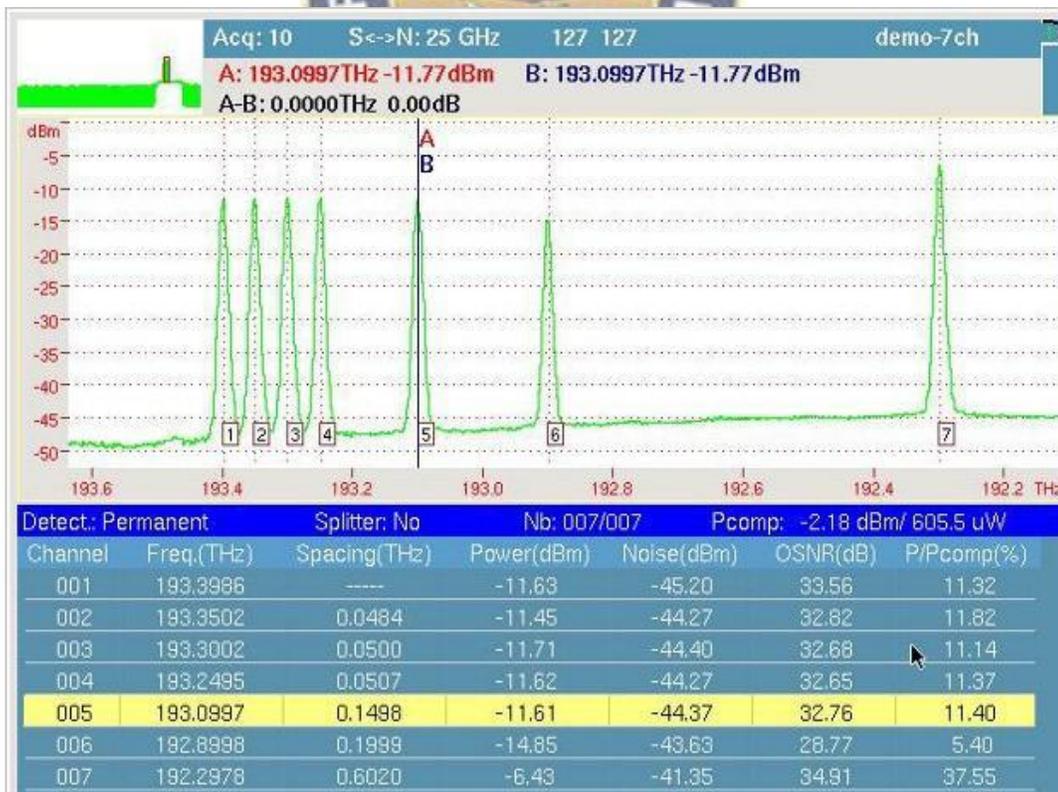


Figura 35 –Medición de potencias con equipo OSA.

Fuente "OSA-110M, PC" <https://www.fossfiberoptics.com/optisk-spektrumsanalysator-osa-110m-pc->

6.2.3 Medición de potencia en punto de referencia Rs.

La última etapa de la ecualización se realiza en el punto Rs, en el puerto Rx del dominio LA.

Ecualización-Paso 5: Posterior a que la señal LA viaja a través de toda la ruta óptica OLS del dominio nativo y esta entrega la señal demultiplexada en el punto de referencia Rs, se debe realizar una medición de potencia para verificar el cumplimiento de los valores diseñados del presupuesto de potencia óptica, es decir la señal Rx este en nivel de potencia adecuado para ser procesada por el dominio LA y entregar las señales de cliente finalmente, que es el objetivo de la solución DWDM.

La verificación se debe realizar con equipo analizador de espectro OSA en el punto de medición 5 (fig.30), interfaz de referencia Rs y también se debe realizar la verificación en el NMS de los transponder/transceiver del dominio LA. Si los pasos anteriores de la ecualización se han cumplido, junto con los ajustes necesarios de potencia y ganancia, el paso 5 de la ecualización no requerirá ningún ajuste adicional.

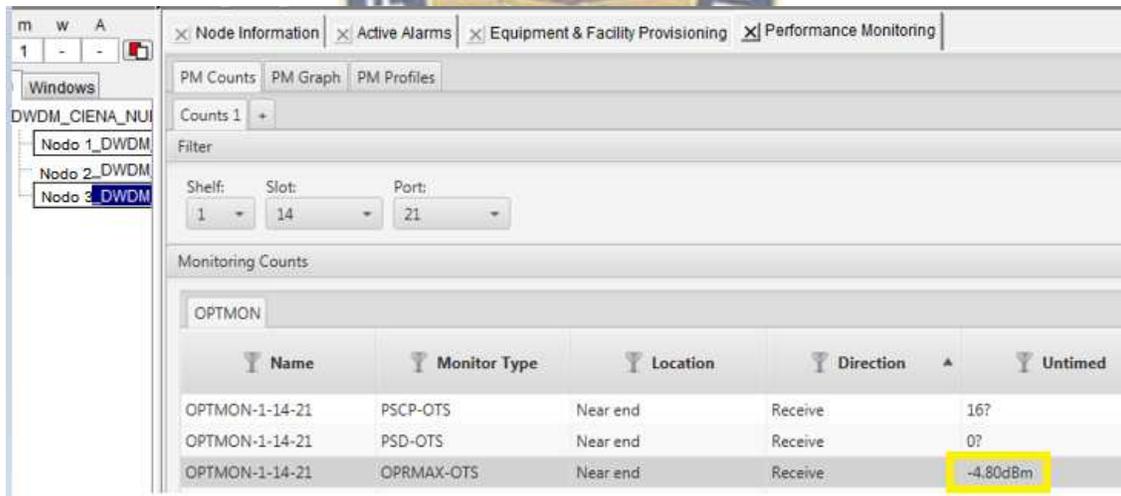


Figura 36 –Verificación de Nivel de potencia Rx en dominio LA.

Fuente: Relexamiento de configuración de red DWDM de un Operador.

En la figura 36 se muestra la medición de la potencia de Rx en el punto de referencia Rs, este valor considera también la degradación de la capa de adaptación entre Rs y el puerto Rx en el dominio LA. La medición y ecualización de potencias es el primer paso para la puesta en marcha de la solución LA, adicionalmente se debe realizar la verificación de parámetros de interconexión según lo indicado en el apartado 5.2.3.2.

6.3 Medición de OSNR en la ruta óptica e interfaces Ss y Rs.

Los principales aspectos de degradaciones en la red nativa están en función del espectro de canales DWDM que pueden acumular efectos de inclinación y ondulación de la ganancia a medida que las señales se propagan a lo largo de una cadena de amplificadores ópticos, el ruido generado en la ruta de transporte óptico se conoce como ASE (Amplified Spontaneous Emission). Cada amplificador introduce ruido que causa la disminución de la relación señal-ruido OSNR, este valor refleja con precisión la calidad de las señales ópticas y es uno de los criterios para determinar la calidad de la comunicación en el extremo de la recepción.

Desde el punto de vista de la transmisión en la red nativa en la salida del multiplexor hacia los amplificadores ópticos, el parámetro OSNR tiene un valor calculado y ajustados correctamente desde el diseño de la red DWDM nativa, entonces para la señal de salida suponiendo que la potencia óptica es P_s y que la potencia de ruido de emisión espontánea (ASE) del amplificador dentro del ancho de banda ($0,1 \text{ nm}$ generalmente) de una λ es P_n , el OSNR se obtendrá directamente como se muestra en la ecuación 6.1.

$$\text{OSNR} = P_s / P_n \tag{6.1}$$

En la figura 36 se muestra la medición de OSNR de una señal óptica a partir de la potencia de las señales.

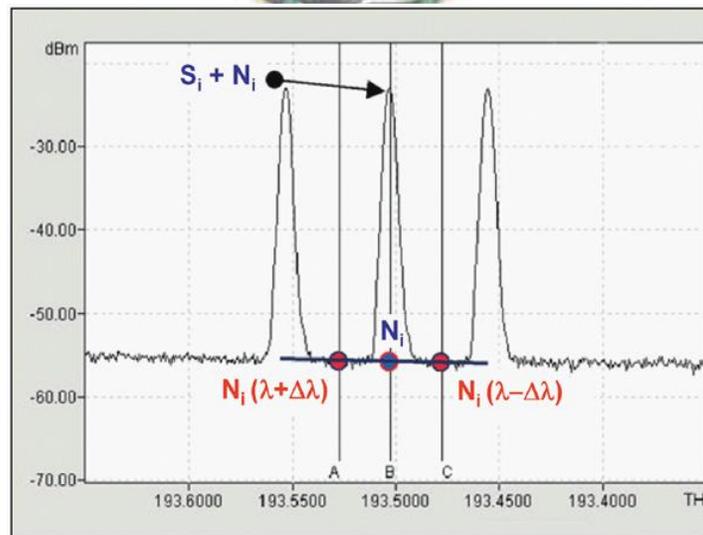


Figura 36 – Representación de medición OSNR.

Fuente: "OSNR" <https://www.conectronica.com/fibra-optica/redes-opticas/monitorizacion-de-osnr-en-redes-opticas>

Las mediciones de OSNR y el correcto margen de este parámetro, son un elemento clave del monitoreo del rendimiento de redes DWDM ya que provee una evaluación de la calidad de la señal y pueden predecir la tasa de errores BER (Bit error rate).

La medición de OSNR se realiza con el equipo OSA, la medición permiten comprobar y depurar el servicio DWDM, en el mismo momento de la puesta en marcha. OSA permite visualizar las portadoras ópticas de la banda DWDM, Con la medida se validan los parámetros de la grilla DWDM ITU-T G.692 y permite verificar automáticamente el cumplimiento de espaciamientos (50/100/200 GHz), potencias, corrimiento de frecuencia. Estas características hacen al OSA ideal para operaciones de puesta en marcha de interconexiones lambda alien.

Las mediciones OSNR que se deben realizar con el analizador de espectro OSA deben ser en los siguientes puntos de medición:

- Punto de Referencia S_s, en el punto de medición 2 (fig.30).
- Ruta de transporte óptico, en el punto de medición 3 (fig.30).
- Punto de Referencia R_s, en el punto de medición 5 (fig.30).

Los resultados de las mediciones se deben comparar con los valores requeridos y diseñados para el transporte de la señal LA en la capa OLS del dominio nativo. En la tabla 31 se muestran los valores de OSNR recomendados para el ejemplo de interconexión lambda alien Ch31 de código de aplicación DW100C-8A5(C)F y frecuencia central $f = 193.100$ (THz) - $\lambda = 1552.52$ (nm):

No.	Parámetro	Unid.	DW100C-8A5(C)F
Interfaz en el punto S_s			
1	OSNR Mínimo 193.6 (0.1 nm)	dB	30
Ruta de transporte óptico del punto S_s a R_s			
2	OSNR Salida de Amplificador	dB	>15
3	Penalización OSNR Máxima del trayecto Óptico	dB	5
Interface at point R_s			
4	OSNR Mínimo 193.6 (0.1 nm)	dB	24
5	Tolerancia OSNR del Receptor 193.6 (0.1 nm)	dB	19

Tabla 31 –Parámetros y medición de OSNR en la solución Lambda Alien.

Fuente: Elaboración propia en base parámetros recomendados de interconexión ITU-T G.698.2

Los resultados de las mediciones con OSA y los valores obtenidos deben ajustarse a los valores mínimos de OSNR recomendados. Las líneas 3, 4 y 5 de la tabla 31 son parámetros que fueron explicados en el apartado 5.2.3.2, la línea 1 se debe medir para realizar el cálculo de la penalización OSNR del trayecto óptico. La medición de la línea 2 en la tabla 31 a la salida del amplificador de la red nativa, debe ser realizada posterior a la ecualización de todas las potencias de todas las portadoras incluidas la lambda alienígena.

En la figura 37 se muestra los resultados de una medición con instrumento OSA en la salida del amplificador (punto de medición 3, Fig.30) y se puede apreciar 3 portadoras, la primera es lambda alien y las dos siguientes son nativas.

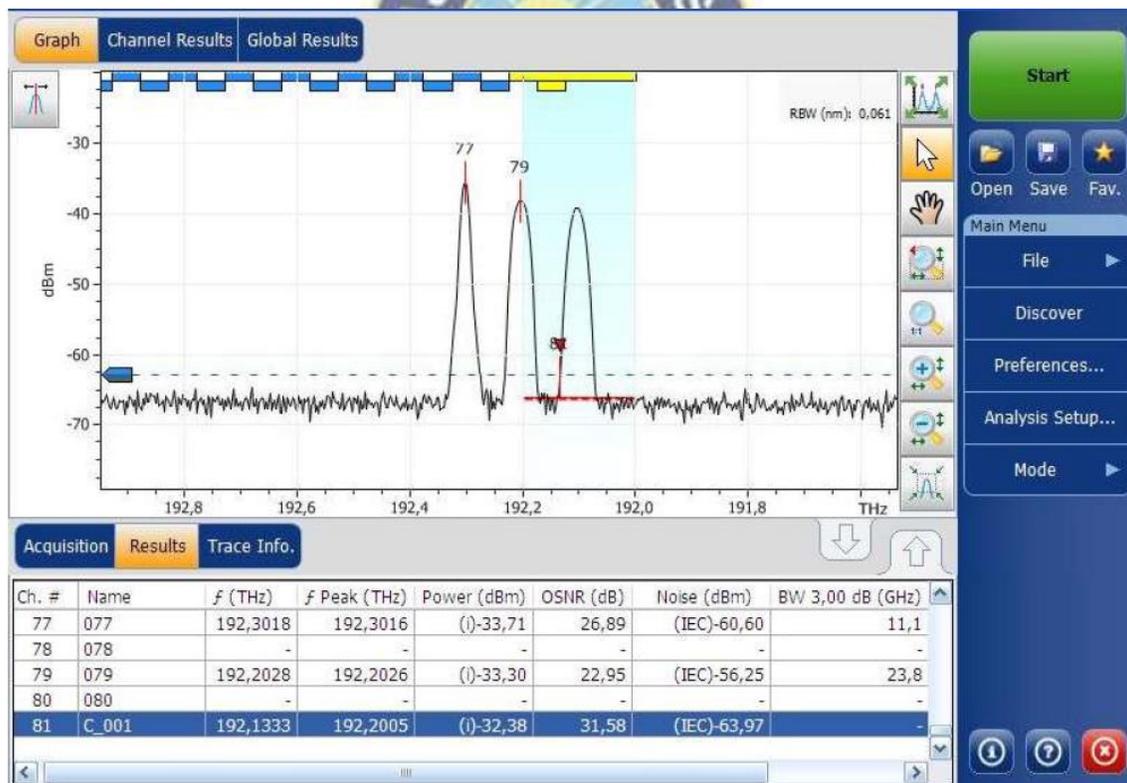


Figura 37 – Medición con analizador de espectro óptico OSA.

Fuente: Resultado prueba lambda alien [13].

En la figura anterior, se ve la medición del espectro con equipo OSA, los parámetros principales a validar son los siguientes:

1. Valor de OSNR en la lambda alien según los parámetros de interconexión de la tabla 31.

2. Valor de OSNR en las lambdas nativas. Se debe validar que no se esté afectando al comportamiento y OSNR de las señales nativas.
3. Nivel de potencia de salida en comparación con la potencia nominal.

En la medida realizada en la figura 37, vamos a validar las 3 características anteriores, primeramente, vemos que el nivel OSNR del canal 77 (lambda alien) es de 26,89dB, mayor a la segunda portadora que es nativa y menor a la tercera portadora que es nativa. Valores de referencia se muestran a continuación [14]:

- 1 0 Gbit/s NRZ: OSNR mayor que aproximadamente 11 dB
- 40 Gbit/s NRZ: OSNR mayor que aproximadamente 17 dB
- 40 Gbit/s DPSK: OSNR mayor que aproximadamente 14 dB
- 100 Gbit/s NRZ: OSNR mayor que aproximadamente 21 dB
- 100 Gbit/s DPSK: OSNR mayor que aproximadamente 18 dB

En el caso del ejemplo de la figura 37, tanto los valores de OSNR de las portadoras alienígenas como las portadoras nativas se encuentran por encima de 20dB. En el caso de la portadora LA, si lo comparamos con los parámetros de interconexión requerido para el ejemplo Ch31 de código de aplicación DW100C-8A5(C)F y frecuencia central $f= 193.100$ (THz) - $\lambda=1552.52$ (nm), el valor de medición OSNR es 26,89 dB mayor al requerido 24dB.

Para el caso de ganancia de salida de los amplificadores, la verificación que se debe realizar es que los niveles estén alrededor del margen de las lambdas nativas, además en caso de que esto no se cumpla y no se advierta, como el caso de que algunas lambdas se sobre-amplifiquen, el nivel de OSNR en el punto de medición 3 (fig.30) bajaría demasiado al punto de que no estaría dentro del margen, lo mismo ocurriría con la interferencia de canal adyacente que si por efectos no controlados llegara a aparecer, los niveles de OSNR no se llegarían a cumplir y las mediciones de diafonía no serían los correctos.

En el aparatado siguiente se verán las mediciones que se deben realizar complementario a la validación OSNR de la solución LA y que permiten llegar con éxito al cumplir los parámetros de interconexión requeridos para la solución lambda alien.

6.4 Medición de parámetros de interconexión Lambda Alien.

Los ajustes y mediciones en la etapa de sintonización, ecualización y validación de valores de OSNR tanto en el dominio nativo como el dominio LA, constituyen las tareas principales para poner en operación la solución lambda alien. Aunque los objetivos principales para el éxito de la interconexión LA, son el cumplimiento del presupuesto óptico y el valor aceptable de OSNR en el punto de referencia Rs, se deben realizar las mediciones y validación de los parámetros de interconexión a continuación, de acuerdo con la recomendación ITU-T G.698.2.

6.4.1 Mediciones complementarias con analizador de espectro.

Las mediciones complementarias con analizador de espectro OSA están relacionadas a la medición de la calidad de la portadora alien y el comportamiento en conjunto con las portadoras nativas, se utilizan los puntos de medición 1 y 3 (fig.30) para obtener los parámetros requeridos a continuación:

No.	Parámetro	Unid.	DW100C-8A5(C)F	Equipo
	Interfaz en el punto S_s			
1	Relación mínima de supresión de modo lateral	dB	30	OSA
	Ruta de transporte óptico del punto S_s a R_s			
3	Ondulación Máxima	dB	2.5	OSA
4	Diafonía máxima entre canales	dB	-16	OSA
5	Diafonía interferométrica máxima	dB	-25	OSA

Tabla 32 – Mediciones complementarias con Analizador de Espectro Óptico.

Fuente: Elaboración propia en base parámetros recomendados de interconexión ITU-T G.698.2

Los resultados de la medición de los parámetros indicados en la tabla 32, deben cumplir los valores recomendados, aunque de este grupo de parámetros los más importantes a considerar son la medición de diafonía (crosstalk) ya que afectaría de forma directa al valor OSNR requerido para las portadoras individuales y llegaría a afectar el BER, es decir se tendría afectación de algunas portadoras nativas por causa de la inyección de la señal lambda alien. En el caso de existir diafonía se debe realizar un ajuste de potencias, es decir realizar otra ecualización de parámetros en la señal lambda alien para ajustarse a los valores requeridos y que no se tenga afectación a la red nativa.

6.4.2 Medición con analizador de modulación óptica.

La medición de modulación óptica es una medida avanzada de parámetros de una señal DWDM coherente, no es exclusivo para la solución LA, sino que las mediciones de la modulación óptica sirven para determinar el comportamiento de una señal coherente que tiene información con polarizaciones ortogonales en modulaciones complejas para redes arriba de 40G, 100G.

El equipo que se utiliza para realizar mediciones de modulación óptica se denomina Optical Modulation Analyzer (OMA) y es un equipo específico para el fin de medir varios parámetros de la polarización de una portadora DWDM y obtener diagramas de modulación de señal:

- Diagrama óptico I-Q de la señal (modulación coherente).
- Diagrama óptico de la constelación.
- Diagrama de ojo de la señal (modulación NRZ).
- Error del Vector de magnitud EVM.
- Offset I-Q.
- Ganancia desbalanceada entre I y Q.
- SNR basado en EVM.
- Ancho de línea Laser.

Para el caso de las mediciones con equipo OMA en la solución lambda alien, las mediciones se deben realizar para los parámetros indicados en el apartado 5.2.3.2, que están referidos a la polarización de la seña LA cómo la medida en la ruta de transporte óptico en el dominio nativo. En la tabla 33 se muestra los parámetros de interconexión que se deben medir con OMA.

Para las mediciones de parámetros de pérdida dependiente de la polarización y la velocidad de rotación de polarización se debe realizar con un equipo específico denominado Optical Polarization Analyzer (OPA). Este equipo es para señales DWDM coherentes solamente y mide también valores como:

- Estado de Polarización (State of polarization SOP).
- Grado de Polarización (Degree of polarization DOP).

- Retardo Diferencial de Grupo (DGD-Diferential Group Delay).

Los parámetros que se deben medir con instrumento OMA y OPA son los que están en la tabla 33.

No.	Parámetro	Unid.	DW100C-8A5(C)F	Equipo
Interfaz en el punto S_s				
1	Diferencia Máxima de potencia entre polarizaciones	dB	1.5	OMA
2	Máximo error del vector de Magnitud	%	26	OMA
3	Máximo offset de I-Q	dB	-25	OMA
4	Ancho máximo de línea láser	kHz	500	OMA
Ruta de transporte óptico del punto S_s a R_s				
4	Máxima pérdida dependiente de la polarización	dB	1.5	OPA
5	Velocidad Máxima de rotación de Polarización	krad/s	50	OPA

Tabla 33 –Medición con Analizador de Modulación Óptica.

Fuente: Elaboración propia en base parámetros recomendados de interconexión ITU-T G.698.2

Las mediciones se deben realizar en los puntos de medición 1 y 4 (fig.30), esto es en el punto de referencia S_s y la ruta de transporte óptica en S_s-R_s en la salida del demultiplexor de la red nativa. En cuanto a las responsabilidades de las mediciones, el dueño del dominio LA debe ser responsable de las mediciones en los puntos de referencia S_s y R_s, para las mediciones en la ruta de transporte S_s-R_s, estas deben ser realizadas por parte del operador responsable del dominio nativo.

6.4.3 Medición de dispersión cromática.

La medición del comportamiento de dispersión cromática y el retardo diferencia de grupo DGD, se debe realizar en el punto de medición 4 (fig.30) para verificar el grupo de señales de la red nativa, incluyendo la señal lambda alien. La responsabilidad de la medición debe ser por parte del operador responsable del dominio nativo.

El equipo que se debe utilizar para las mediciones y verificar el cumplimiento de los parámetros requeridos para la interconexión, es el equipo PMD/CD analyzer, que es un analizador de los componentes ópticos del modo de polarización y dispersión cromática.

En la tabla 34 se muestran los parámetros para la interconexión que se deben medir para verificar que el valor de dispersión cromática este en el de rango soportado para el código de aplicación DW100C-8A5(C)F. Como se mencionó anteriormente el responsable de brindar los parámetros de interconexión es el operador dueño de la red DWDM nativa.

No.	Parámetro	Unid.	DW100C-8A5(C)F	Equipo
Ruta de transporte óptico del punto Ss a Rs				
1	Dispersión cromática Máxima (residual)	ps/nm	2400	CD/PMD Analyzer
2	Dispersión cromática Mínima (residual)	ps/nm	-200	CD/PMD Analyzer
3	Máximo Retardo diferencial de Grupo	ps	20	CD/PMD Analyzer

Tabla 34 –Medición con Analizador de Dispersión Cromática.

Fuente: Elaboración propia en base parámetros recomendados de interconexión ITU-T G.698.2

La medición del retardo diferencial de grupo DGD permite conocer la diferencia de tiempo entre fracciones de pulso transmitidos en los estados de polarización de una señal óptica y en conjunto de varias señales ópticas. En el punto de medición 4 (fig.30) permite tener una idea de los valores que tiene el conjunto de señales ópticas (portadoras nativas + portadora lambda alien). En la figura 38 se puede ver la caracterización del parámetro DGD para una señal multiplexada, se puede ver que los mismos cumplen con valor menor a 0,2ps, aunque para el ejemplo del código de aplicación este valor está en margen menor a 20ps.

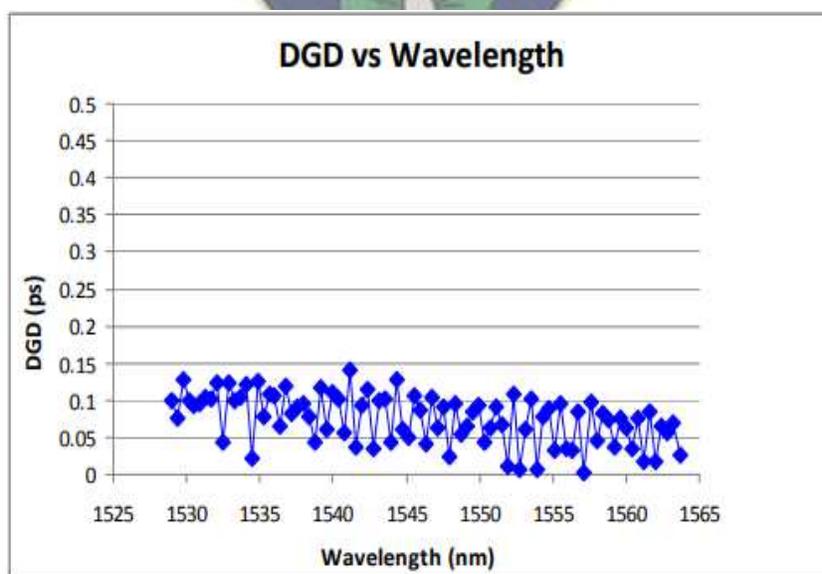


Figura 38 –Medición de DGD en la ruta de transporte óptico Ss-Rs.

Fuente: "First Order PMD Source" <https://lunaimc.com/sites/default/files/assets/files/resource-library/DGD-1000.pdf>

6.4.4 Medición de pérdida y reflectancia en Ss-Rs.

Una medición importante en la verificación de la interconexión de la solución lambda alien, es la medida del retorno óptico de potencia o reflectancia de la señal portadora LA. Esta medición se debe realizar con instrumento OTDR en los puntos de medición 1 y 5 (fig.30). La responsabilidad de las mediciones es del dominio Lambda alien.

En la tabla 35 están los valores recomendados del parámetro de reflectancia en Ss y Rs, así como la reflectancia discreta en la ruta Ss-Rs. Los valores son para el código de aplicación DW100C-8A5(C)F. Aunque en la práctica estos valores son para cualquier código de aplicación.

No.	Parámetro	Unid.	DW100C-8A5(C)F	Equipo
Ruta de transporte óptico del punto Ss a Rs				
1	Pérdida mínima de retorno óptico en Ss	dB	24	OTDR DWDM
2	Máxima reflectancia discreta entre Ss y Rs	dB	-27	OTDR DWDM
Interface at point Rs				
3	Reflectancia Máxima del Receptor	dB	-27	OTDR DWDM

Tabla 35 –Medición con OTDR DWDM.

Fuente: Elaboración propia en base parámetros recomendados de interconexión ITU-T G.698.2

En la figura 39 se muestra un ejemplo de una medición de reflectancia y pérdidas asociadas a un canal DWDM, el canal medido es el Ch37 y sus valores en norma.



Figura 39 –Medición con OTDR DWDM.

Fuente: "Module, CWDM OTDR, 8-channel" <https://www.foscofiberoptics.com/modul-cw-dm-otdr-8-kanaler-1471-1611-nm>

6.5 Certificación de lado cliente en dominio Lambda Alien.

Posterior a la interconexión de la señal alien en la red DWDM nativa, se debe realizar la certificación de los circuitos o circuito en el lado cliente del dominio LA. Esta medición es parte de la certificación final de la solución LA, puesto que los resultados verificarán la integridad de la solución y permitirán conocer los resultados de la sintonización y ecualización de la interconexión de la señal alien en la red DWDM nativa de otra red. En el caso de que las mediciones de certificación End-to-End sean las correctas y pasen las pruebas requeridas, se puede concluir que la solución lambda alien ha sido interconectada con éxito.

Antes de las pruebas de certificación End-to-End, se debe realizar el ajuste correcto de los niveles de Tx/Rx en el transceiver utilizado que se conecta con el instrumento de medición y también la revisión de todos los transceiver que intervienen en la prueba, parámetros como la temperatura y que la señal óptica no estén saturando al receptor de cada transceiver, deben ser revisados y ajustados inclusive con atenuadores ópticos fijos o variables, esto es para no dañar ningún transceiver en las pruebas.

6.5.1 Pruebas de bit error rate con BERT.

Las pruebas de medición de BER o tasa de errores de bit, es una prueba muy importante para los circuitos cliente de una red óptica DWDM, esta medición resume la calidad del servicio y permite saber la confiabilidad de este enlace para el transporte de la capacidad certificada. El equipo de medición se denomina BERT (BER Tester) y existen diferentes fabricantes/modelos de este tipo de equipamiento, actualmente también se tiene una variación a los equipos BERT de 10G, 40G, 100G-400G que son equipos BERT de alto rendimiento. Los resultados de la medición BER de un circuito están directamente relacionados con el cumplimiento de los parámetros de interconexión recomendados en la solución lambda alien.

La prueba BER especifica una probabilidad promedio de identificación de bits errados, los valores recomendados de BER óptimo son mayores a 10^{-12} , esto significaría que, en promedio

de 10^{12} bits transmitidos, 1 bit se lee incorrectamente o esta errado. La ecuación de medición de BER es la siguiente:

$$BER = \frac{E(t)}{N(t)} \quad (6.2)$$

Donde $E(t)$ es el número de bits con error en intervalo de tiempo t , y $N(t)$ es el número total de bits transmitidos en el mismo intervalo de tiempo t .

La forma de realizar la prueba de BER se realiza siempre de extremo a extremo, en un extremo del enlace se debe conectar un equipo generador de secuencias PRBS (Pseudo-random binary sequence) que transmite una señal determinista que emite una serie de unos y ceros digitales, por el otro extremo del enlace se conecta el equipo de recepción que mide y detecta la cantidad de errores de la secuencia determinista enviada por el transmisor PRBS.

En la figura 40 se muestra el esquema de conexión de la prueba BER para la interconexión de la solución LA, se debe tomar en cuenta a la suma de dominios LA y dominio nativo como el sistema bajo prueba o SUT (System under Test).



Figura 40 –Medición de BER en la solución lambda alien.

Fuente: Elaboración propia.

En la práctica la medición con instrumento BERT, se realiza sobre un puerto cliente Tx/Rx en el transponder o el equipo que administra el transceiver DWDM en un extremo del enlace y en el otro extremo que conecta un loopback físico (patchcord fibra óptica) que retorna la señal al instrumento BERT, tal como se muestra en la figura 41.

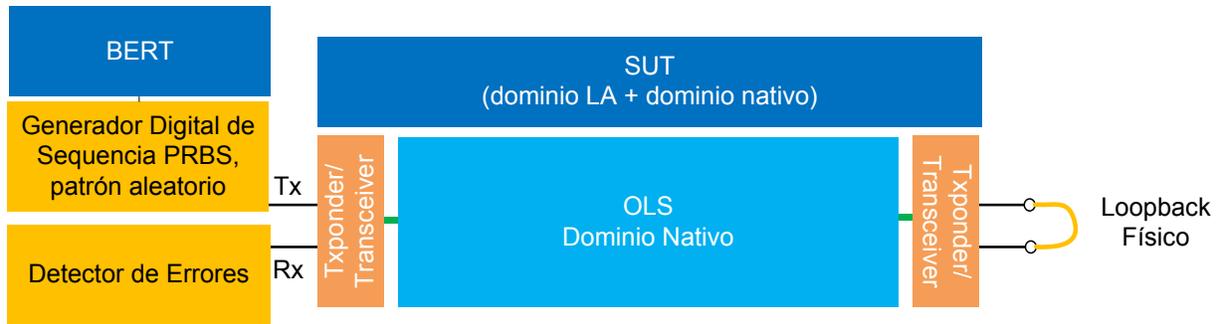


Figura 41 –Medición con instrumento BERT en la solución lambda alien.

Fuente: Elaboración propia.

La forma de medición más utilizada es como se muestra en la figura 41, esta forma de medición puede validar BER correcto de un solo puerto del transponder, sea la capacidad que sea, el instrumento BERT debe ajustarse al tipo de puerto y capacidad (Geth, SONET/SDH), en la actualidad y para la solución LA no es muy frecuente el alta de servicios sobre SONET/SDH y la mayor parte de servicios cliente es sobre puertos Gigabit Ethernet de 10, 40, 100Gbps, entonces para esto se debe contar con el instrumento capaz de medir puertos en estas capacidades y hallar la forma de medir la capacidad total realizando arreglos de loopbacks físicos.

En la figura 42 se muestra un ejemplo de medición de BER en un enlace de 100G (OTU4) que tiene 10 puertos de 10Gbps a nivel de clientes, aunque la prueba BER se puede realizar puerto por puerto, resultando en 10 mediciones con sus resultados, una forma muy intrusiva de realizar la prueba de todos los puertos de cliente y finalmente probar el enlace a su máxima capacidad, es realizando loopbacks físico en los puertos cliente en ambos extremos, realizando un arreglo de forma que la señal de 10G generada por el instrumento BERT e inyectada en el primer puerto de transponder se devuelva al origen y sea inyectada en el segundo puerto del transponder, este viaje y retorne para ser inyectado en el tercer puerto, así sucesivamente hasta que la señal de 10G generada por el instrumento BERT pueda recorrer los 10 puertos del transponder, poniendo a prueba todos los puertos y también la capacidad del transponder ocupando los 100G de la solución DWDM.

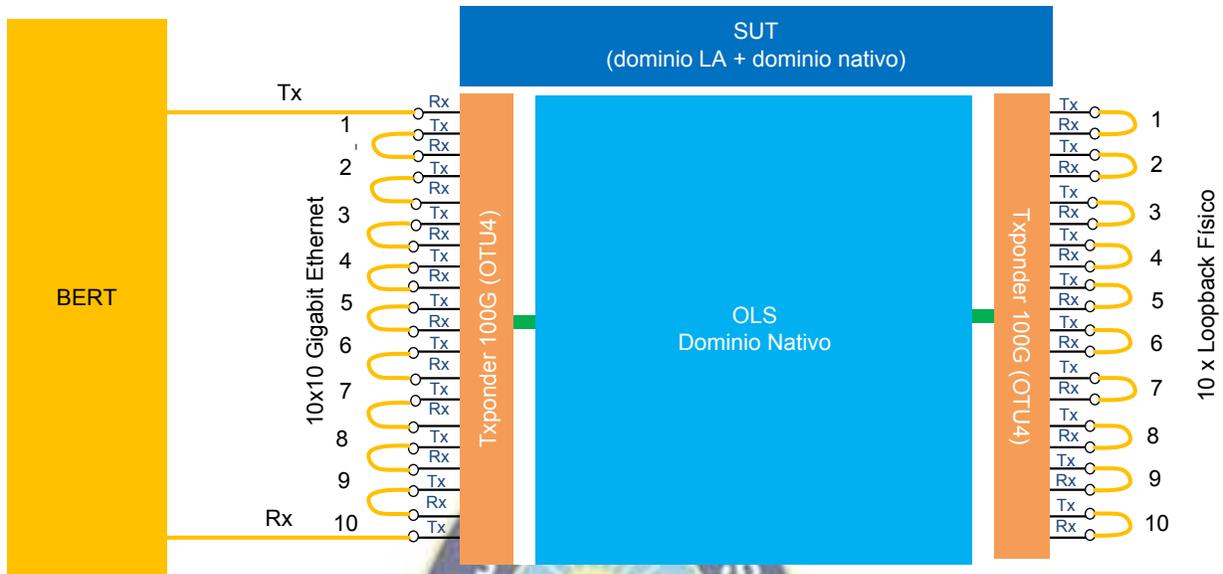


Figura 42 –Medición con instrumento BERT para transponder 100G OTU4.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la prueba de medición BER, son una calificación de que la prueba PASA o NO PASA el BER deseado.

Tiempo de Medición BER: El tiempo que se requiere para una prueba BER y determinar si pasa o no un valor de requerido (Ej.- 10^{-12}), depende de la capacidad en enlace a certificar, por ejemplo, para un enlace de 10Gbps, el tiempo requerido será:

$$\frac{10^{12}(\text{bit})}{10\text{Gbps}} = \frac{10^{12}}{10 \times 10^9} = 100(\text{s}) = 1,6 (\text{min}) \quad (6.3)$$

Aunque el tiempo mínimo para medir un BER 10^{-12} es de 1,6 min, es recomendable lanzar la primera prueba de certificación que se realiza sobre la red por un tiempo de 24 horas para medir la estabilidad del enlace a lo largo del comportamiento en horarios pico de tráfico, aunque las redes DWDM no son afectadas por esto, es preferible tener la certificación para validar elementos que puedan no estar siendo considerados en la prueba, ejemplo conectores en la capa de adaptación de la solución lambda alien.

Ejemplo de Medición BER: En la tabla 36 se muestra el resultado en resumen de una prueba BER de un enlace de 10Gbps (Gigabit Ethernet), los puntos más resaltantes de la prueba de BER, son la capacidad del canal, el tipo de conector, la velocidad de transmisión como parámetros de

lanzamiento de la prueba y entre los resultados el objetivo de la prueba es cumplir un valor de BER configurado, en la medición de la tabla 36, se tiene un BER threshold de 10^{-12} y el resultado de la prueba está marcado en verde como PASS, paso la prueba, adicionalmente muestra los contadores de bits errados (cero en la prueba) y la cantidad de frames transmitidos y recibidos.

Setup Summary

Application Type	EtherBERT - EtherBERT - Framed
-------------------------	--------------------------------

Interface	Port 1
Interface/Rate	10GE LAN
Connector	SFP+

Frame Size (Bytes)	TX Rate (Gbit/s)
9600 Fixed	9,28520

BER

	TX	RX
Pattern	PRBS9 Non-Inverted	PRBS9 Non-Inverted

Bit Error	
Pass/Fail Verdict	Bit Error Rate
BER Threshold	1,0E-12

BER Pass/Fail Verdict	
Pass/Fail Verdict	PASS

BER Alarms	Seconds
No Traffic	0
Pattern Loss	0

Results Summary

Test Status	
Test Status	Completed
Pass/Fail Verdict	PASS
Start Time	22/09/2017 13:21:08
Duration	00d:01:00:02
Power Recovery	0

BER Errors	Seconds	Count	Rate
Bit Error	0	0	0,00E00
Mismatch '0'	0	0	0,00E00
Mismatch '1'	0	0	0,00E00

Traffic	Frame Count
Total TX	434181783
Total RX	434181783

Tabla 36 –Ejemplo Resumen de Medición BER enlace 10Gbps.

Fuente: Elaboración propia en base a medición en una red DWDM.

6.5.2 Pruebas RFC2544 y Y.1564.

Complementaria a las pruebas de BER sobre una red de transporte, están las pruebas RFC2544 orientadas a evaluar enlaces de transporte punto a punto y las pruebas Y.1564 orientadas a evaluar calidad y múltiples servicios. RFC2544 está orientado más a la certificación de enlaces punto a punto con capacidades de ancho de banda igual en toda la ruta, este es el caso de redes DWDM que son enlaces de transporte óptico y la prueba Y.1564 evalúa mejores enlaces con diferentes tipos de tecnología de transporte de extremo a extremo, diferentes velocidades, haciendo diferencia de tipos de tráfico y calificando un SLA (Service level agreement).

Las pruebas de certificación más comunes a nivel de cliente son sobre circuitos de 10G, pero para el caso de pruebas de certificación de circuitos de 40G, 100G y mayores, aunque las

pruebas son similares se tienen diferencias a tomar en cuenta. Una diferencia importante es que se debe contar al igual que la prueba BER, con interfaces compatibles en el equipo de medición. Adicionalmente el equipo debe contar con la capacidad de realizar pruebas sobre puertos de 100G.

Para la medición con instrumento, la forma de medición se debe realizar de forma similar a la medición con instrumento BERT como se muestra en la figura 41, adicionalmente en caso de que se requiera algún arreglo para la medición de varios puertos simultáneamente, se puede aplicar un arreglo igual al indicado para la medición BERT en la figura 42.

La medición RFC2544 está orientada a la activación de enlaces backbone y permite medir diferentes tamaños de paquetes de forma secuencial, aunque estas pruebas requieren tiempo largos de medición (promedio de 24 hrs), en conjunto con la prueba BER lo hace una prueba muy importante para la solución lambda alien, el enfoque de ambas pruebas en conjunto permite certificar los resultados de la sintonización y ecualización de la solución LA, ya que ambas pruebas deben realizarse en un entorno de laboratorio en la activación de los servicios, al momento de la entrega de los circuitos cliente, las pruebas pueden realizarse de forma detallada, incluyendo las pruebas de conmutación de tráfico cuando el dominio nativo contiene diferentes rutas o tiene redundancia de extremo a extremo, el tiempo no debería ser mayor a 50ms.

Para el caso de las pruebas de certificación Y.1564, estas están orientadas a la certificación en la activación de servicios Ethernet, no exclusivamente a enlaces punto a punto de redes backbone como las pruebas RFC2544, sino para servicios Ethernet que pueden contener en medio diferentes tipos de redes, pueden ser redes DWDM, redes Ethernet e incluso redes heredadas, aunque están enfocadas en este tipo de enlaces, también sirven para la certificación de la solución LA, de igual forma en combinación con las pruebas BER. El tiempo de medición es menor en comparación RFC2544, ya que puede transmitir diferentes servicios de forma simultánea. En la figura 43 se muestran las diferencias entre ambas pruebas.

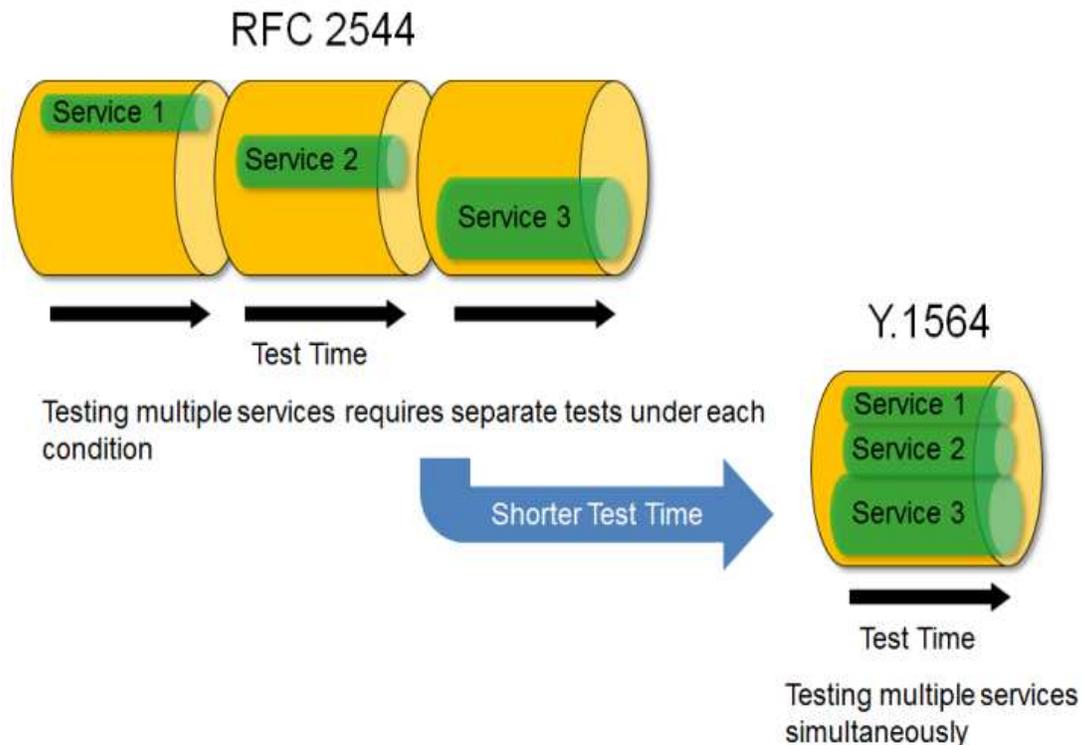


Figura 43 –Pruebas RFC2544 vs Y.1564 con diferentes servicios.

Fuente: Página Atecorp. <https://www.atecorp.com/compliance-standards/itu-t/itu-t-y-1564>

En la tabla 37 se indican los tipos de medición que se realizan en cada prueba. Ambos sirven para las pruebas en LA. Pueden utilizarse en función de los puntos de medición de lado cliente, considerando si son enlaces de transporte (RFC2544) o enlaces enrutados (Y.1564).

	RFC2544	Y.1564
Enlaces 10, 40, >100GE	Activación de un nuevo enlace backbone o conexión única end-to-end	Activación de conexiones Ethernet o servicios en la red core
Parámetros de medición	Throughput Latencia Tasa de pérdida de tramas Burstability (Ráfagas)	Relación de pérdida de tramas Latencia Jitter (variación de la latencia) CIR (Capacidad Mínima Asegurada) EIR (Excedente de Capacidad) CBS (Tamaño de ráfagas de Bytes) Vigilancia de Tráfico
Enfoque de Medición	Prueba de una secuencia a la vez Identifica el máximo rendimiento	Prueba de múltiples servicios, rendimiento de transferencia de tramas y evaluación de SLA

Tabla 37 –Resumen de Pruebas RFC2544 vs Y.1564.

Fuente: Elaboración propia en base a información de pruebas RFC2544 y Y.1564.

6.6 Gestión de la red.

En la etapa posterior a la implementación, sintonización y ecualización de una red DWDM que trabaja dentro de una solución lambda alien, es necesario delimitar hasta dónde se puede gestionar la red entre los participantes que intercambian señales coloreadas, es decir la gestión del dominio LA y nativo. Para delimitar correctamente la gestión de la red, se debe partir de que se tiene dos dominios muy bien diferenciados (dominio LA y dominio nativo) y sabiendo que cada dominio puede pertenecer a diferentes fabricantes. Las opciones de gestión se limitan a gestión hasta el límite de cada dominio y gestión fuera de banda compartida.

6.6.1 Gestión delimitada por el dominio.

En la figura 14 se muestra la representación de cada dominio en una solución lambda alien, por un lado, tenemos al dominio nativo como aquel que es parte de una red ya implementada y en operación, una red estable y ecualizada. Lo anterior significa que, siendo una solución nativa, entonces está conformada por equipos/tarjetas de un mismo fabricante, aquí aclarar que cada fabricante en este momento tiene sistemas de gestión propietarios y brindan funcionalidades de *monitoreo y control que servirán para la operación de la red como la configuración de nuevos servicios*.

Lo anterior significa que el dominio nativo ya tiene un sistema de gestión propietario y está a cargo del operador del dominio nativo, cuando otro sistema DWDM requiere conectar sus señales coloreadas al sistema nativo, el punto de interconexión es la capa de adaptación que figura como límite entre el dominio LA y el nativo o host. En este caso la gestión del dominio LA depende también del fabricante y puede ser cualquier otro, diferente al sistema de gestión del dominio nativo. En este punto se puede decir que la solución natural posterior del intercambio de señales coloreadas entre dominios es mantener la gestión de la red hasta el límite de cada dominio, es decir se puede monitorear la señal coloreada del otro dominio hasta el límite de monitoreo en la capa de adaptación. Posiblemente ante desajustes de la red sea necesario realizar ecualizaciones nuevamente y aquello podrá ser monitoreado por ambos participantes de cada dominio.

Entre las funcionalidades más importantes que se recomiendan en la capa OLS que pertenece al dominio nativo en la solución LA son:

1. Medición de potencias de todas las señales o lambdas de la red en toda la ruta de transporte óptico, de extremo a extremo.
2. Medición de valores OSNR en la ruta de transporte óptico de extremo a extremo.
3. Medición de pérdida óptica en la ruta de transporte óptico, mediante un equipo adicional que convierte a la capa OLS en un medidor tipo OTDR DWDM.

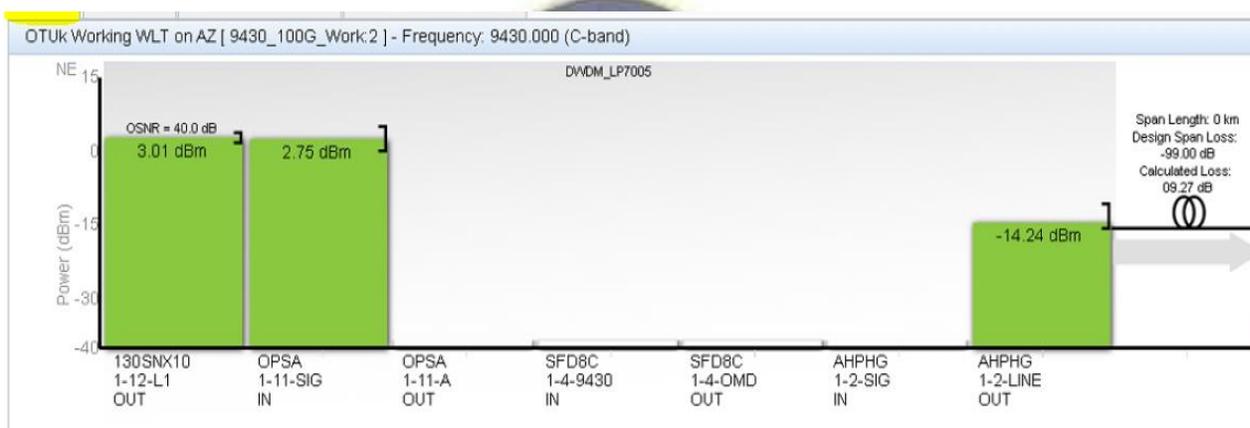


Figura 44 –Monitoreo de niveles ópticos y OSNR en gestor DWDM.

Fuente: Elaboración propia en base a la gestión de una red DWDM.

Las funcionalidades recomendadas en el punto 1 y 2, permiten un ágil monitoreo de la red en tiempo real para validaciones de los niveles ópticos de cada portadora (señales coloreadas individuales), es decir se puede verificar que se encuentran en margen de diseño y además permite tener un valor calculado de OSNR por cada lambda. Aunque existen algunos fabricantes que ofrecen una funcionalidad dentro de sus sistemas de gestión como se muestra en la figura 44, es recomendable que en la operación de la red exista esta evaluación periódica de estos parámetros de la red.

La funcionalidad 3 que implica tener un OTDR en la capa OLS, permite agilizar tareas de mantenimiento en caso de fallas de la red de fibra óptica en planta externa, esta funcionalidad puede estar incluida dentro de la capa OLS (embebido) o existen equipos externos que puede monitorear de forma continua, ejemplo NQMSfiber (Network Quality Monitoring System) de EXFO o Fiberwatch de NTEST.

6.6.2 Gestión fuera de banda compartida.

En el caso de que los dominios LA y nativo sean del mismo fabricante, las tareas de ecualización pueden ser más sencillas e incluso a nivel de gestión de la red, se puede compartir algunos parámetros que son configurables en forma de espejo de cada lado. De todas formas, esto no significaría que la gestión es unificada ya que aún seguiremos teniendo dos dominios diferentes. La figura a nivel de gestión nativa unificada no es posible en los casos de ser el mismo fabricante o no.

Para una solución de gestión unificada se debe trabajar a nivel de protocolos de gestión fuera de banda y que sería compartido por ambos dominios, esto no es posible de forma nativa ya que ningún fabricante lo ofrece actualmente. Para tener una solución de gestión unificada nos debemos apoyar en el protocolo SNMP (Simple Network Management Protocol) y complementarlo con un software desarrollado por terceros que pueda brindarnos gestión unificada, a nivel de monitoreo una de ellas podría ser PRTG (Paessler Router Traffic Grapher) y un poco más completo existen software propietario de fabricantes como Cisco y Huawei que se van actualizando constantemente en poder implementar conectividad entre gestores de orden superior.

Aunque esto es posible, en la práctica esto debe discutirse previamente al acuerdo de intercambio de señales coloreadas entre los responsables de cada dominio LA y nativo, ya que las amenazas pueden ser mayores a los beneficios obtenidos, la gestión unificada y compartida significaría que el responsable de la gestión puede realizar cambios en un dominio que no le pertenece directamente y puede ocasionar fallos atribuibles que pueden tener afectaciones de servicios difíciles de identificar, también a nivel de cargos regulatorios que no se podrían aclarar a quien correspondería como responsable.

En la actualidad, existe una tendencia al desarrollo de redes ópticas abiertas por parte de varios organismos y asociaciones, el desarrollo de interfaces abiertas para la gestión de redes de diferentes fabricantes en la capa de gestión OSS (Operation Support system) aún no está definida completamente para su implementación en redes ópticas DWDM.

6.6.3 Responsabilidad de control de la red.

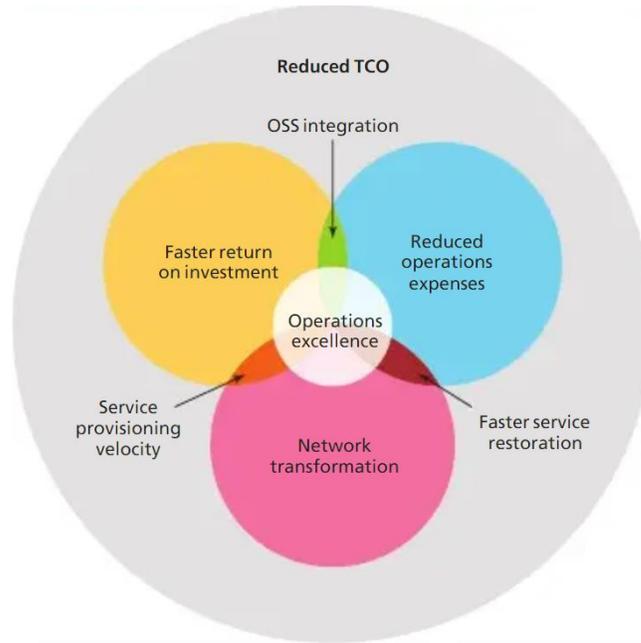


Figura 45 – Ventajas de un sistema de gestión unificado.

Fuente: Página: Academia.edu [15]

Aunque la recomendación de cualquier fabricante de soluciones DWDM o cualquier otro fabricante de tecnología de telecomunicaciones es siempre contar con un sistema de gestión unificado y centralizado, tal como se muestra en la figura 45 y sabiendo todas las ventajas que esta representan dentro de cualquier proyecto; retorno de la inversión y gastos de operación OPEX, un punto importante es que nuestra red pueda adaptarse a los cambios, es decir tener flexibilidad antes requerimiento de cambios, este punto es muy importante en una solución de servicios lambda alien y debemos diferenciar los requerimientos de control mínimos en cada dominio, esto se explica a continuación.

Dominio Nativo: El dominio nativo es el que recibe las señales coloreadas externas a su red, es la que multiplexa con el resto de señales, las amplifica, envía las señales de control de extremo a extremo y finalmente envía las señales a través de un par de hilos de fibra óptica hasta los equipos del resto de la red, adicionalmente es responsable del mantenimiento de la red de fibra óptica de planta externa, es responsable de brindar la redundancia ante fallas de la red de fibra óptica y además es responsable en su mayor parte de la ecualización de la solución lambda alien.

Todos los puntos anteriores demuestran que a nivel de tecnología en una solución lambda alien, el que lleva la mayor carga y responsabilidad es el dominio nativo, esto es así para cualquier red DWDM en operación, pero cuando brinda una solución LA a un tercero, se deben enfatizar que es responsable de la operación no solo de su propio tráfico sino también de un tráfico de terceros, que lo lleva a convertirse en el dueño del dominio nativo como un hospedador que brinda servicios de alquiler de capa óptica.

Para el caso de responsabilidad de control (gestión, configuración y monitoreo) debido a lo explicado en el párrafo anterior, la mayor responsabilidad es del dominio nativo, por esta razón es necesario que sea cual sea el fabricante el dominio nativo tenga obligatoriamente un sistema de gestión unificado (solución de gestión que incluye software en servidores) que ayuden y brinden las ventajas mostradas en la figura 45.

Dominio Lambda Alien: A diferencia del dominio nativo y después de la capa de adaptación, el dominio LA contiene principalmente al transponder para conectar al dominio nativo, entonces el requerimiento a nivel de control es mucho menor que el requerido en el dominio nativo, este dominio está libre del monitoreo del resto de equipamiento DWDM, no tiene un dominio de gestión compartido con el dominio nativo, aunque si le afecta los eventos de fallas de equipos, fallas de enrutamiento óptico, fallas a nivel de planta externa, etc, solamente le importa la conectividad de extremo a extremo entre dominios LA y la calidad de las señales clientes.

En el dominio LA no es necesario un sistema de gestión unificado que abarque de forma completa la necesidad de control de la red, en muchos casos un sistema de gestión embebido en los equipos es suficiente para el control. Como se mencionó en el punto anterior no es recomendable implementar un sistema de gestión unificado ni compartir el control de ambos dominios. Cada dominio es responsable hasta el límite de la capa de adaptación. Para las tareas de operación y mantenimiento cada dominio es responsable de sus propios equipos, hasta el límite de su dominio, es recomendable establecer tiempos de atención, restablecimiento y resolución en casos de fallas para el acuerdo de interconexión de la solución lambda alien, esto permitirá conocer al dominio LA los tiempos de solución en casos de falla que serán atendidos en el dominio nativo.,



CAPÍTULO VII
ANÁLISIS DE COSTOS EN LAMBDA ALIEN

7. ANALISIS DE COSTOS EN LAMBDA ALIEN.

Los operadores de red están siempre optimizando su red, para atender mejor a la demanda de su red activa, pero además tienen 2 retos importantes en cuanto al comportamiento y el crecimiento de su red:

1. Incrementar la capacidad de ancho de banda en su red de transporte Backbone/Backhaul (BB/BH).
2. Reducir el costo por bit para nuevos enlaces de transporte BB/BH.

Según lo indicado anteriormente, el análisis de costos para la implementación de una red de transporte DWDM debe evaluarse cuidadosamente desde una perspectiva económica ya que implica altos costos en el CAPEX. El análisis de costos debe usar el criterio de VAN (Valor Actual Neto) que permite comparar proyectos a largo plazo, midiendo flujos de caja generados por los servicios prestados en términos de valor presente, relacionando así ingresos y costos, la solución LA mejora el VAN en comparación con una red DWDM, aunque para un cálculo real de la optimización de este valor en LA, debe ser evaluado en situaciones reales específicas.

Considerando que Lambda Alien, no requiere tener una capa OLS propia, los costos de implementación se reducen sustancialmente, ya que se requiere implementar la red del dominio LA solamente, esto es implementar transponders y la capa de adaptación que son cableados en los puntos de referencia Ss y Rs hacia los transponders. A continuación, se analizarán los diferentes costos CAPEX, OPEX comparativos entre DWDM y LA, la optimización de costos CAPEX/OPEX en LA, la optimización del ROI (Tasa de Retorno de la inversión) y aumento del MUN (Margen de Utilidad Neto) con la solución LA.

7.1 CAPEX de implementación de redes DWDM.

Los costos de implementación de una red propia DWDM son asociados a un costo CAPEX para el proyecto, este puede ser un proyecto de ampliación, crecimiento o modernización dentro de la red de un operador de servicios, normalmente estos precios son clasificados en dos tipos, los costos de la implementación de equipos y los costos de implementación de la fibra óptica.

7.1.1 Costos de implementación de equipos de Red DWDM.

Según la arquitectura de red DWDM explicado anteriormente en el apartado 2.3.4 y el costo de implementación de estos por parte del proveedor (puede ser el mismo fabricante). A continuación, plantaremos una ecuación para el cálculo del CAPEX de equipos DWDM.

Costos de implementación de una red DWDM, incluye nodos OTM, nodos OLA y nodos OADM, además de los costos de diseño, instalación y configuración. La ecuación es:

$$CAPEX_{EQUIPOS} = nC_{OTM} + mC_{OLA} + pC_{OADM} + C_{DIC} \quad (7.1)$$

Donde:

C_{OTM} es el costo unitario de los equipos para conformar un nodo OTM, chasis y tarjetas requeridas; transponders, filtros, multiplexores, amplificadores, si el nodo OTM tendrá más de 1 grado a nivel de enlaces de redundancia o por la topología de la red, el costo incrementa por la cantidad de grados. “n” es la cantidad de nodos OTM.

C_{OLA} es el costo unitario de los equipos para conformar un nodo OLA que cumplen función de regeneradores, amplificando la señal multiplexada, chasis y tarjetas requeridas; amplificadoras. “m” es la cantidad de nodos OLA.

C_{OADM} es el costo unitario de los equipos para un nodo R/F/OADM, que permite añadir y extraer lambdas de la señal multiplexada, además de tener 2 grados mínimamente, el costo unitario incrementa por cada grado adicional. “p” es la cantidad de nodos OADM.

C_{DIC} es el costo asociado al diseño, instalación y configuración para una red DWDM completa por parte del proveedor de los equipos y contratistas respectivamente.

Los tiempos de implementación de los equipos DWDM, no son extensos y dependiendo de la cantidad de nodos DWDM que se deben implementar, se puede ajustar tiempos de implementación en semanas cuando todos los emplazamientos estén listos para la instalación de equipos, en los casos que se requieran obras civiles y construcción de emplazamientos para los nodos, el costo se debe sumar a los costos OTM, OLA, OADM y aumentará más el costo final.

7.1.2 Costos de implementación de red de Fibra Óptica.

Los costos CAPEX asociados a la implementación de fibra óptica son:

Costos de implementación de los enlaces de fibra óptica (IFO), depende de la cantidad de enlaces requeridos para el diseño de la topología y la longitud total de fibra óptica en kilómetros que se requiere instalar para todos los enlaces. La ecuación es:

$$CAPEX_{IFO} = qC_{LINK} + dC_{IFO/km} + dC_{FO/km} \quad (7.2)$$

Donde:

C_{LINK} es el costo unitario para implementar un nodo, cada enlace necesita el ingreso de la fibra óptica a 2 nodos, contempla el ingreso del cable, acometida, ductos, canalización y ODFs (optical distribution frame). Este costo depende de la cantidad de hilos del enlace y se debe multiplicar el costo unitario por la cantidad “q” de enlaces.

$C_{IFO/km}$ es el costo unitario de la instalación de 1 km de fibra óptica en planta externa (mano de obra). Se multiplica por “d” que es la longitud total de km de todos los enlaces.

$C_{FO/km}$ es el costo unitario del material de cable de fibra óptica y accesorios (ferretería, postes y otros) requeridos por kilómetro. Se multiplica por “d” que es la longitud total de kilómetros de todos los enlaces.

7.1.3 Costo total de implementación de red DWDM.

El costo total de CAPEX para la implementación de una red DWDM se puede definir en la siguiente ecuación, es la suma del costo de equipos y la implementación de fibra óptica:

$$CAPEX = CAPEX_{EQUIPOS} + CAPEX_{IFO} \quad (7.3)$$

Adicionalmente a los costos requeridos para la implementación de una red DWDM, se debe considerar el tiempo del proyecto, que implica tiempos de entrega de los equipos por parte del proveedor y los tiempos de implementación de fibra óptica.

7.2 OPEX en una red DWDM.

Los costos asociados a la operación y mantenimiento de una red DWDM, esta relacionados principalmente a la cantidad de nodos que tiene la red DWDM, se puede agrupar en 4 grupos para el costo anual desde el monitoreo de las alarmas de la red hasta la atención de fallas, cambio de repuestos, los emplazamientos de los nodos y soporte técnico de la red.

7.2.1 Costo de monitoreo de red.

Para mantener la continuidad de la operación de una red DWDM se debe contar con un centro de monitoreo de red NOC (Network Operation Center), donde se visualicen y vigilen alarmas de la red (críticas, mayores y menores), es necesario mantener un grupo de especialistas monitoreando de forma continua 24x7. La cantidad total de elementos se cuantifica según:

$$Nro. Elementos_{MONITOREO} (NEM) = n + m + p + q \quad (7.4)$$

Donde de acuerdo con la cuantificación de costos CAPEX indicado en el apartado 7.1, n es la cantidad de nodos OTM, m es la cantidad de nodos OLA, p es la cantidad de nodos OADM. q es la cantidad de enlaces de fibra óptica. El costo asociado al monitoreo de la red (24x7), por la cantidad de elementos para la supervisión, se puede estimar en la siguiente ecuación:

$$OPEX_{MON} = NEM \cdot C_{elemento} + N \cdot C_{Empleado} \quad (7.5)$$

Donde:

$C_{elemento}$ es el costo unitario anual requerido para el monitoreo de la red DWDM (incluye nodos y enlaces de fibra óptica), cubre emplazamiento, gastos de energía eléctrica. Este costo se multiplica por “NEM” (cantidad total de elementos).

$C_{Empleado}$ es el costo unitario anual que se requiere para mantener un empleado que pueda estar vigilando por lapso de 8 horas al día, para cubrir la cantidad de 24x7 se requiere 4 personas mínimamente. “N” es la cantidad de personas que ocupan para realizar el monitoreo.

$OPEX_{MON}$ considera un costo anual recurrente, generalmente los operadores tienen centros NOC ya en operación y $OPEX_{MON}$ para la red DWDM se considera cero. $OPEX_{MON}=0$.

7.2.2 Costos de mantenimiento de red DWDM.

Son requeridas principalmente el mantenimiento preventivo y correctivo.

Mantenimiento Preventivo: Nodos DWDM y la red de fibra óptica, incluyen tareas de visitas a los nodos periódicamente para limpieza, corrección de alarmas, mejora de parámetros ópticos y otros que permitan adelantarse a fallas potenciales, reduciendo el tiempo medio de fallas MTTF (Mean Time to Failure). Adicionalmente, el mantenimiento en la red fibra óptica es requerido para reducir el tiempo medio entre fallas MTBF (Mean Time Between Failures), realizando visita al trazado, identificando riesgos y midiendo con OTDR las degradaciones.

Mantenimiento Correctivo: El mantenimiento correctivo se requiere para atención de fallas de la red, emergencias, alarmas de la red, son todas las acciones que se deben realizar para dar solución a una falla que provoca pérdida parcial o total de los servicios de la red de transporte DWDM o también afectación a los servicios finales del operador. Entre los eventos se debe considerar la falla de equipos DWDM y corte de fibra óptica en planta externa.

OPEX de Mantenimiento: El costo de mantenimiento depende de la cantidad de nodos y la longitud total de kilómetros de fibra óptica (d), la cantidad de nodos de la red DWDM es:

$$Nodos_{DWDM}(ND) = n + m + p \quad (7.6)$$

Donde de acuerdo con la cuantificación de costos CAPEX indicado en el apartado 7.1; n es la cantidad de nodos OTM, m es la cantidad de nodos OLA, p es la cantidad de nodos OADM, d es la longitud total de kilómetros de fibra óptica.

Entonces, el costo unitario anual de mantenimiento se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$OPEX_{MANTTO} = ND \cdot C_{MN} + dC_{MFO/km} \quad (7.7)$$

Donde:

C_{MN} es el costo unitario anual de mantenimiento de un nodo DWDM.

$C_{MFO/km}$ es el costo unitario anual de mantenimiento para 1 kilómetro de fibra óptica, este costo se debe multiplicar por la cantidad total de km de fibra óptica " d " en la red DWDM.

7.2.3 Costos de repuestos de red DWDM.

Los puntos de vista para el control de los repuestos se deben enfocar principalmente en el tiempo promedio de fallas MTTF y la rotación de equipos durante el último año de operación. Se puede clasificar los costos en 2 tipos; costo de equipos para repuestos de la red (transponder, multiplexores, amplificadores y otros) y los insumos para la reparación de fallas de fibra óptica.

Equipos de Repuesto para Nodos DWDM:

Los repuestos para la red deben ser elementos de las mismas características a los equipos en operación, son para reemplazar de forma temporal o definitiva a tarjetas o elementos con fallas, la cuantificación de la cantidad de piezas requeridas se denomina stock de repuestos y siempre se debe tener stock disponible. La cantidad de repuestos requeridos para la red está definida por la rotación de los equipos con falla durante un año, depende indirectamente de la cantidad de nodos DWDM en la red y en los casos donde el MTTF es mayor a 1 año y no se tenga rotación de repuestos, se debe tener 1 pieza como mínimo disponible para cada tipo de nodo. El costo total de repuestos de equipos se puede estimar en la siguiente ecuación:

$$OPEX_{SPARES} = xC_{OTM} + yC_{OLA} + zC_{OADM} \quad (7.8)$$

Donde:

C_{OTM} es el costo unitario de los equipos “activos” que serán repuestos para fallas de un nodo OTM. “x” es la cantidad de repuestos de este tipo que se requieren.

C_{OLA} es el costo unitario de los equipos “activos” que serán repuestos para fallas de un nodo OLA. “y” es la cantidad de repuestos de este tipo que se requieren.

C_{OADM} es el costo unitario de los equipos “activos” que serán repuestos para fallas de un nodo OADM, ROADM, FOADM. “z” es la cantidad de repuestos de este tipo que se requieren.

En los casos donde la rotación anual es nula y el tiempo MTTF es mayor a 1 año, de debe tomar en cuenta una cantidad de 1, caso contrario la cantidad debe ser igual a la rotación anual (es la cantidad total de salidas de repuestos en el último año).

Insumos para la red de Fibra Óptica:

Los insumos de fibra óptica son todos aquellos elementos que se requieren para la atención de fallas provocadas por elementos naturales o por terceros, tanto en planta interna como externa, están; el cable de fibra óptica, accesorios como ferretería, postes, muflas de empalme y otros. La cantidad de insumos requeridos están relacionados con la cantidad de kilómetros de fibra óptica en la red y también al tipo de terreno donde se tiene la fibra óptica, en terrenos selváticos se tiene más eventos de fallas, debido a roedores, caída de árboles, chequeos (incendios), pero en terrenos llanos, se tiene menos eventos de fibra óptica. El costo es:

$$OPEX_{INSUMOS-FO} = n C_{FO/km} \quad (7.9)$$

$C_{FO/km}$ es el costo unitario del material de insumo de cable de fibra óptica y accesorios (ferretería, postes y otros) requerido por kilómetro para la atención de fallas. Se multiplica por “n” que es la longitud total de kilómetros requerido para insumos, en el caso de que no se tengan información, se puede estimar un valor de $n=5$ de forma inicial para un año.

Costo total OPEX Repuestos:

$$OPEX_{REPUESTOS} = OPEX_{SPARES} + OPEX_{INSUMOS} \quad (7.10)$$

7.2.4 Costo de emplazamiento de nodos.

Los costos asociados al emplazamiento de los nodos DWDM, dependen del tipo de infraestructura que se utiliza en los nodos y depende de la cantidad de nodos de la red. Incluye gasto realizado en energía eléctrica de cada nodo, alquiler de emplazamientos donde opera el nodo y el costo de alquiler de postes o canalización por donde viaja la fibra óptica. El costo es:

$$OPEX_{EMPLZ} = nC_{eNODO} + dC_{eFO/km} \quad (7.11)$$

Donde:

C_{eNODO} es el costo unitario anual del emplazamiento de un nodo. “n” es cantidad de nodos. $C_{eFO/km}$ es el costo unitario anual del emplazamiento por km de FO. Se multiplica por “d” que es la longitud total de kilómetros.

7.2.5 Costo de soporte técnico.

El soporte técnico para una red DWDM es muy importante ya que este se encarga de dar solución a eventos de criticidad alta, donde se tiene afectación por fallas tanto en configuraciones, como de hardware, este servicio de soporte técnico es brindado mayormente por los fabricantes de equipos DWDM. La tarea del soporte técnico es reducir el tiempo de restauración y solución de una falla, mejorando el tiempo de reparación de fallas MTTR.

El costo anual del soporte técnico depende de la cantidad de nodos de una red DWDM multiplicado por el precio anual unitario de soporte técnico, la ecuación es:

$$OPEX_{SOPORTE} = ND \cdot C_{UST} \quad (7.12)$$

Donde:

C_{UST} es el costo unitario anual de soporte técnico para un nodo DWDM. Depende de cada tipo de tecnología de equipos DWDM.

ND es la cantidad total de nodos DWDM según la ecuación (7.6).

Las tareas de soporte técnico, en algunos casos brinda soporte de repuestos, lo cual encarece más el precio de soporte, esto puede ser útil en los casos donde se tiene alta rotación de repuestos, pero en los casos donde no se tiene rotación alta, es preferible la administración de repuestos por parte del dueño de la red DWDM.

7.2.6 Costo total OPEX de una red DWDM.

El costo total OPEX de una red DWDM, se compone de todos los costos indicados en los puntos indicados anteriormente, se puede asociar el costo total OPEX para una red DWDM, como la suma de costos del monitoreo de la red, costos de mantenimiento preventivo y correctivo, costos de los repuestos e insumos, costo de emplazamiento de nodos y el costo de soporte técnico.

$$OPEX = OPEX_{MON} + OPEX_{MANTTO} + OPEX_{REPUESTOS} + OPEX_{EMPLZ} + OPEX_{SOPORTE} \quad (7.13)$$

El costo anterior es el total requerido para 1 año de operación de la red DWDM.

7.3 Análisis comparativo de costos.

La implementación de la solución lambda como alternativa de implementación de una red propia, tiene ventajas a nivel de reducción de los costos CAPEX y OPEX asociados. Por un lado, el dueño del dominio LA reduce CAPEX y OPEX para la implementación de la solución, logrando así el objetivo de la implementación de redes backbone/backhaul.

7.3.1 Diferencias de costos de implementación Lambda Alien.

Para la implementación de una red DWDM con la solución LA, debemos tomar en cuenta que no se requiere implementar la capa óptica OLS, puesto que pertenece al domino nativo.

CAPEX de implementación de Lambda Alien: A continuación, se muestran los costos que se requieren y los que no se requieren como CAPEX para la solución LA.

- a) **Costos de implementación LA:** se requiere solamente la implementación de transponder o transceivers, en los casos de uso de transponders, es añadido el costo de chasis a este costo. No incluye nodos OTM, ni nodos OLA, ni nodos OADM:

$$CAPEX_{EQ-LA} = nC_{TRANS} + C_{DIC-LA} \quad (7.14)$$

Donde: C_{TRANS} es el costo unitario de los transponders (incluye chasis) o transceivers. “n” es la cantidad de transceivers/transponder que se requieren implementar.

C_{DIC-LA} es el costo asociado al diseño, instalación y configuración de los transponder/transceivers, que se debe pagar al proveedor de los equipos y contratistas.

- b) **Costos de implementación de Red de fibra óptica en LA:** No se requiere ya que la red de fibra óptica pertenece al dominio nativo.

$$CAPEX_{IFO-LA} = 0 \quad (7.15)$$

El CAPEX total para LA sería el siguiente:

$$CAPEX = CAPEX_{EQ-LA} \quad (7.16)$$

OPEX de una Red DWDM con Lambda Alien: A continuación, se muestran los costos que se requieren y los que no se requieren como OPEX.

- a) **Costo de Monitoreo de dominio LA:** En general debido a que los operadores tienen ya centros NOC en operación. Se puede simplificar a un costo cero o mínimo:

$$OPEX_{MON} = 0 \quad (7.17)$$

- b) **Costo de Mantenimiento de Dominio LA:** Se requiere mantenimiento de los nodos transponder/transceivers, pero no se requiere mantenimiento de la red fibra óptica ya que pertenece al dominio nativo, su ecuación:

$$OPEX_{MANTTO} = n \cdot C_{M-LA} + dC_{MFO/km} \quad (7.18)$$

Donde: C_{M-LA} es el costo unitario anual de mantenimiento de un nodo LA (transponder/transceiver). “n” es la cantidad total de transponder/transceivers.

- c) **Costo de Repuestos para Dominio LA:** Se requieren repuestos, pero solamente para transponder y transceivers, no se requieren insumos para red de fibra óptica:

$$OPEX_{SPARES_LA} = xC_{TRANS} + OPEX_{INSUMOS_FO} \quad (7.19)$$

Donde: C_{TRANS} es el costo unitario de los transponder/transceiver de repuestos para fallas y “x” es la cantidad de repuestos requerido, cuando la rotación anual es nula y $MTTF > 1$ año, su valor es 1, caso contrario su valor es igual a la rotación anual.

- d) **Costo de emplazamiento de nodos LA:** Se requiere el costo anual asociado solo a nodos LA, no se requiere el costo unitario de emplazamiento para la red de fibra óptica, ya que pertenece al dominio LA. El costo total se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$OPEX_{EMPLZ_LA} = nC_{eTRANS} + dC_{eFO/km} \quad (7.20)$$

Donde: C_{eTRANS} es el costo unitario anual del emplazamiento de un nodo LA, transponder y transceiver, incluye costo de energía eléctrica en un año y alquiler de infraestructura por un año. “n” es la cantidad de transponder y transceivers.

- e) **Costo de Soporte Técnico LA:** Se requiere soporte para transponder y transceiver, aunque por la cantidad de elementos el costo tiende a disminuir, la ecuación es:

$$OPEX_{SOP_LA} = n \cdot C_{UST-LA} \quad (7.21)$$

Donde: C_{UST-LA} es el costo unitario anual. “n” es la cantidad total de nodos LA.

- f) **Costo de Arrendamiento en LA:** Este costo se añade al OPEX de la red DWDM LA, se debe realizar los pagos por el uso de su capa óptica OLS. El costo es:

$$OPEX_{ARR_LA} = M \cdot C_{LA} \quad (7.22)$$

Donde: C_{LA} es el costo unitario anual de arrendamiento de un canal para lambda alien.

M es la cantidad total de canales alquilados, mínimo es 1.

7.3.2 Optimización en CAPEX/OPEX de solución Lambda Alien.

A continuación, se muestra un resumen de las diferencias más importantes en CAPEX y OPEX, de la implementación de una red DWDM propia y una red DWDM con LA.

Análisis de Optimización de CAPEX: En la tabla 38 se muestra un resumen de los costos comparativos a la implementación de una red DWDM propia y una red DWDM basada en la solución Lambda Alien. En la tabla se encuentra remarcado en naranja el costo predominante en cada línea que se requiere para el CAPEX.

CAPEX	CAPEX Red DWDM	Implementación DWDM	Solución Lambda Alien	Ecuación
Equipos	Nodos OTM	$n \cdot C(\text{otm})$	0	7.1
	Nodos OLA	$m \cdot C(\text{ola})$	0	7.1
	Nodos OADM/ROADM/FOADM	$p \cdot C(\text{oadm})$	0	7.1
	Transponder/Transceiver	0	$n \cdot C(\text{trans})$	7.14
	Diseño, instalación, configuración	$C(\text{dic})$	$C(\text{dic-la})$	7.1 / 7.14
Fibra Óptica	Ingreso a nodos (2 por enlace)	$q \cdot C(\text{link})$	0	7.2
	Instalación de Fibra Óptica km	$d \cdot C(\text{ifo/km})$	0	7.2
	Material Fibra óptica e accesorios	$d \cdot C(\text{fo/km})$	0	7.2

Tabla 38 –Comparativo de Costos CAPEX en Lambda Alien.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se puede ver que existen diferencias en el costo predominante de la implementación de nodos DWDM y la implementación de fibra óptica, debido a que LA no requiere implementar nodos OTM, OLA y OADM, sino solamente transponder/transceiver en el dominio LA, se tiene una reducción en equipos. Aunque en ambos casos se requiere contar con el servicio de diseño, instalación y configuración (DIC), se puede hacer una gran diferencia entre los costos DIC de una red DWDM y LA, ya que el primero se requiere una cantidad de nodos acumulada de OTN, OLA y OADM, que suben el costo DIC. En cambio, en LA solo se requiere instalación del transponder, lo cual hace que el costo DIC baje considerablemente.

Otro punto que remarcar, es que no se requiere la implementación de una red de fibra óptica propia, debido a que no se requiere en la solución LA, ya que se usa la red de fibra óptica del dominio nativo. Esta diferencia marca una brecha importante de la comparación de precios y se puede decir que, para redes de larga distancia, significa una alta reducción en el CAPEX.

Análisis de Optimización de OPEX: Los costos OPEX se planifican generalmente de forma anual debido a que son recurrentes, de forma anual se debe añadir nuevos costos OPEX de redes nuevas DWDM o en algunos casos eliminar algunos costos para optimizar el gasto anual en mantenimiento de la red.

Para operadores de redes DWDM que contienen todos los elementos de la arquitectura y además mantienen redes de fibra óptica propia, el costo OPEX es muy elevado en función de la cantidad de nodos DWDM y cantidad de kilómetros de fibra, por lo cual siempre se deben buscar formas de eliminar gastos no justificados o que no tengan beneficio en mantener la disponibilidad de la red.

En la tabla 39 se muestra un resumen comparativo de costos, se encuentra remarcado en naranja los costos más significativos en cada caso, entre los gastos más altos de todo el costo OPEX, están el mantenimiento de la red de fibra óptica y los repuestos para la red, en segundo lugar, los precios del gasto de energía eléctrica y emplazamiento de la red fibra óptica, en tercer lugar, el costo de soporte técnico y monitoreo de la red.

OPEX	OPEX Red DWDM	DWDM	Solución Lambda Alien	Ecuación
Monitoreo	Monitoreo de Red	OPEX(mon)	OPEX(mon-la)	7.5 / 7.17
Mantenimiento	Mantenimiento Nodos	$ND \cdot C(mn)$	$n \times C(m-la)$	7.7 / 7.18
	Mantenimiento Fibra Óptica	$d \cdot C(mfo/km)$	0	7.7
Repuestos	Repuestos Nodo OTM	$x \cdot C(otm)$	0	7.8
	Repuestos Nodo OLA	$y \cdot C(ola)$	0	7.8
	Repuestos Nodo OADM	$z \cdot C(oadm)$	0	7.8
	Repuesto Transponder	0	$x \cdot C(trans)$	7.19
	Insumos para Mantenimiento FO	$n \cdot C(fo/km)$	0	7.9
Emplazamiento	Nodos OTM	$n \cdot C(eotm)$	0	7.11
	Nodos OLA	$m \cdot C(eola)$	0	7.11
	Nodos OADM/ROADM/FOADM	$p \cdot C(eoadm)$	0	7.11
	Nodo Transponder/Transceiver	0	$n \cdot C(etrans)$	7.20
	Emplazamiento FO	$d \cdot C(efo/km)$	0	7.11
Soporte	Soporte Técnico	$ND \cdot C(ust)$	$n \cdot C(ust-la)$	7.12 / 7.21
Arrendamiento	Alquiler de Lambda	0	$M \cdot C(la)$	7.22

Tabla 39 –Comparativo de Costos CAPEX en Lambda Alien.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se puede apreciar que en el caso de la solución LA, existen costos que directamente se anulan, es decir su costo OPEX es cero, los costos heredados son los siguientes:

- a) **Costo de Monitoreo de red LA:** Mayormente el costo es cero en operadores que tienen red en operación y no representa un costo adicional.
- b) **Costo de Mantenimiento de Nodos LA:** El costo de mantenimiento de un nodo LA también se reduce bastante en comparación con un nodo DWDM, puesto que no contiene todos los elementos de la arquitectura, solo transponder o transceivers.
- c) **Costo de Repuestos LA:** En este ítem se tiene una reducción en los costos de repuestos requeridos, solo se requieren repuestos para transponder y/o transceiver.
- d) **Costo de Emplazamiento Nodos LA:** Los costos de emplazamiento también representan una reducción, ya que solo requieren nodos terminales de los transponder.
- e) **Costo de Soporte Técnico:** Solo se requiere para nodos terminales transponders.

7.3.3 Costo de arrendamiento en Lambda Alien.

En la tabla 39 de comparación de costos OPEX entre una red DWDM y Lambda Alien, el último punto de la tabla muestra el costo del alquiler o arrendamiento de un canal DWDM en la capa óptica OLS del dominio nativo. El costo de alquiler está en función de las características como:

- Frecuencia Lambda para arrendar en THz.
- Espaciamiento de Canal en GHz.
- Distancia entre puntos de referencia Rs y Ss en kilómetros.

Con estos datos se estima el costo unitario de la Ec. 7.22: C_{LA} según la siguiente ecuación:

$$C_{LA} = d_{RS-SS} \cdot Y \quad (7.23)$$

Donde:

Y es el costo unitario anual de un canal LA que se transporta por un km de distancia.

D_{RS-SS} es la distancia total en km entre los puntos de referencia de un enlace LA.

El costo unitario anual Y , es definido por el dueño del dominio nativo, este a su vez, realizará un mejor aprovechamiento de su red, es decir brindará capacidad de transporte de capa óptica que no utiliza al 100% y que esta ociosa, por este servicio el dueño del dominio nativo definirá un canon anual de arrendamiento, este canon finalmente se convierte en un ingreso (revenue) que reducirá su gasto OPEX y que mejorará el Valor actual Neto VAN de su red DWDM. Además, al dominio nativo le conviene alquilar su capacidad ociosa, debido a que el OPEX es el mismo y no se reduce o aumenta cuando implementa canales para la solución lambda alien en su red.

En caso de nuestro entorno en Bolivia, un precio referencial promedio de los operadores que brindan alquiler de capacidad entre 2 puntos, es de 250 USD anual por un km de distancia para un circuito de 10G, por lo cual un precio referencial para alquiler de una lambda en el dominio nativo DWDM de otro operador en Bolivia puede estar en un precio mínimo aproximado de 500 USD (200%) por cada km de distancia entre los puntos de referencia Rs-Ss, a esto se debe multiplicar la cantidad de km requeridos para tener el costo anual de arrendamiento de un lambda alien.

7.3.4 Ejemplo análisis comparativo de costos La Paz-Desaguadero.

Se requiere un enlace de transporte backbone para transportar 100G de capacidad entre los puntos de La Paz y la frontera hacia Perú en la localidad de Desaguadero (salida internacional), el objetivo del proyecto es la conexión con un proveedor de internet en Perú. Para este proyecto se requiere capacidad de 100G en nodos terminales y la longitud total de fibra óptica entre nodos es de 125km. El diagrama de FO se muestra en la figura 6.4 del apartado 2.3.5.5.

Una opción es implementar una red DWDM (tiempo estimado de 6 meses) y la otra es la implementación de la solución LA, considerando que en la misma ruta se tiene varios operadores que tienen red operativa, tanto en equipos como fibra óptica, por lo cual es factible.

Dentro del análisis de factibilidad, se deben considerar los siguientes puntos:

- Tiempo en que se requiere los servicios: En caso de una red DWDM, el tiempo de construcción de la red de FO, depende tanto de la importación del material como la instalación, en redes >100Km, puede demorar entre 3 y 9 meses, promedio de 6 meses.
- Verificar si existen ya operadores que tengan red desplegada, puesto que esto es un requisito necesario para implementar la solución LA, de hecho, también se convierte en una limitante, en los casos de que no se tenga ninguna red activa de otro operador.
- Verificación de las características técnicas y precios de los equipos y soluciones disponibles para implementar nodos DWDM (OTM, OLA, ROADM, FOADM), tiempos de entrega de los equipos. Cada operador realiza evaluación de los fabricantes.

7.3.4.1 Comparativo de CAPEX DWDM vs. Lambda Alien.

Para implementación de una red propia (sin considerar el tiempo de implementación entre una red DWDM completa y la solución LA) se debe considerar implementación de nodos OTM, OLA y red de fibra óptica de 125km, por otro lado, la solución LA solamente requiere implementación de transponders en nodos terminales.

Para el caso de una red DWDM propia se requiere la implementación de 2 nodos OTM y 1 nodo regenerador OLA, los nodos OTM deben estar en los extremos del enlace, uno en La Paz y otro

en Desaguadero, el nodo OLA debe implementarse a 25km en la ciudad de El Alto. Adicionalmente se requiere la instalación de 125km de FO (se considera fibra de 24 hilos G.655 vano 100m) y el ingreso de acometidas 1 en cada nodo OTM y 2 ingresos en el nodo OLA. El diagrama requerido para la implementación de una red DWDM propia se encuentra en la figura 46, la red deberá transportar una sola lambda de 100G, con espaciamento de 100GHz para que en los puntos extremos pueda desagregar en 10 circuitos de 10Gbps no coloreados.



Figura 46 –Diagrama de Red DWDM La Paz-Desaguadero (Caso de Red Propia).

Fuente: Elaboración propia.

La implementación considerando la solución LA, toma en cuenta uso de la capa óptica de un operador con red DWDM entre los puntos extremos, esta capa conforma el dominio nativo. En la figura 47 se muestra el diagrama de red para el caso de implementar la solución LA, se considera de hecho la factibilidad de alquilar el uso de una lambda entre La Paz y Desaguadero de 100GHz de espaciamento, ya que varios operadores de la región tienen red desplegada y en operación entre estos dos puntos.



Figura 47 –Diagrama de Red DWDM La Paz-Desaguadero (Caso Lambda Alien).

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de la solución LA, se requieren implementar 2 transponders en los nodos extremos (La Paz y Desaguadero) y no se requiere la implementación de la red de fibra óptica en el tramo.

Análisis de Costos CAPEX DWDM vs LA: Para este ejemplo, como caso de estudio (no como comparativo entre precios de distintos fabricantes) y con el objetivo específico de demostrar la mejora de costos con LA, se realizará el análisis de costos con precios actuales de equipos y servicios en tecnología CIENA (en base a precios referenciales de un proyecto en Bolivia) y costos promedio de fibra óptica e implementación en el mercado actual de 125km.

Para el caso de estudio con CIENA, se utilizarán; un chasis 6500D7/S8, tarjeta transponder de capacidad 10x10G modelo 100G WL3n MOTR, multiplexor de 4 canales con espaciamiento de 100GHz modelo SCMD4 y amplificadores de potencia Tx/Rx modelo FGA-C-Band dopado con erbio (ganancia 23dB), en la tabla 39.1 se muestra el chasis y tarjetas requeridas para cada nodo.

Marca	Tarjetas x Tipo de Nodo	Chasis 6500-D7/S8	Transponder 100G WL3n MOTR	Mux/Demux 4 Channel SCMD4	Amplificador FGA-C-BAND	Aplicación
Ciena	Nodo OTM	1	1	1	4	DWDM
	Nodo OLA	1	-	-	2	DWDM
	Transponder	1	1	-	-	Lambda Alien

Tabla 39.1 –Equipos requeridos CIENA para Ejemplo Red La Paz-Desaguadero.

Fuente: Elaboración propia en base a referencia de costos en un proyecto de un operador.

Considerando precios referenciales de los equipos y tarjetas de la tabla anterior para cada tipo de nodo, además de los costos requeridos para la instalación de la fibra óptica, se cuantifican los costos en cada tipo de nodo (OTN, OLA y LA) y se obtiene los costos comparativos entre DWDM vs LA, los resultados de costos CAPEX DWDM vs LA se encuentra en la tabla 40.

En los costos totales CAPEX de la tabla 40, se puede ver una diferencia de 590k USD (699k USD DWDM-108k USD LA), que representa una reducción de costos del 84.5% aprox. Comparado con una red DWDM propia. Aunque este margen de reducción de costos de 590k USD en CAPEX, corresponde a una tecnología en concreto, en el mercado global, existen soluciones modulares y compactas que se explicaron en el apartado 5.4.1.2 (transceivers) y 5.4.1.3 (transponders desagregados), las cuales tiene costos menores del ejemplo indicados en la tabla 40, esto se traduce en que se puede mejorar aún más el costo CAPEX en la implementación de la solución lambda alien.

CAPEX	CAPEX Red DWDM	QTY	Costo DWDM (USD)		Costo Lambda Alien (USD)		Ecuación Costo Implementación
			Costo Unitario	Costo Subtotal	Costo Unitario	Costo Subtotal	
Equipos	Nodos OTM	2	65,156.00	130,312.00	0	0.00	$n \cdot C(\text{otm})$
	Nodos OLA	1	20,299.00	20,299.00	0	0.00	$m \cdot C(\text{ola})$
	Transponder/Transceiver	2	0	0.00	45,510.00	91,020.00	$p \cdot C(\text{oadm})$
	Diseño, instalación, configuración	1	81,401.00	81,401.00	17,407.00	17,407.00	$C(\text{dic})$
Fibra Óptica	Ingreso a nodos (2 por enlace)	4	199.1	796.40	0	0.00	$q \cdot C(\text{link})$
	Instalación de Fibra Óptica (km)	125	1498.04	187,255.00	0	0.00	$d \cdot C(\text{ifo/km})$
	Material Fibra óptica y accesorios (km)	125	2,232.03	279,003.20	0	0.00	$d \cdot C(\text{fo/km})$
			CAPEX DWDM	699,066.60	CAPEX Lambda Alien	108,427.00	

Tabla 40 –Análisis de Costos CAPEX Ejemplo Red La Paz-Desaguadero.

Fuente: Elaboración propia – Datos de precios unitarios y referenciales utilizados: Anexo A.

Del análisis a detalle de los costos CAPEX indicado en la tabla 40, en la tabla 41 se puede ver los precios comparativos de DWDM vs. LA y la agrupación de los costos totales en cada caso.

CAPEX	CAPEX Red DWDM	QTY	CAPEX DWDM	CAPEX Lambda Alien
Equipos	Nodos OTM	2	232,012.00	108,427.00
	Nodos OLA	1		
	Transponder/Transceiver	2		
	Diseño, instalación, configuración	1		
Fibra Óptica	Ingreso a nodos (2 por enlace)	4	467,054.60	0.00
	Instalación de Fibra Óptica (km)	125		
	Material Fibra óptica/accesorios (km)	125		
		CAPEX (USD)	699,066.60	108,427.00

Tabla 41 –Comparativo de Costos CAPEX Ejemplo Red La Paz-Desaguadero.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior, se puede observar que para la implementación de una red DWDM propia, el mayor costo asociado es la implementación de la red de fibra óptica, aproximadamente 467k USD, por otro lado, este mayor coste, representa en la solución LA, la mayor optimización de CAPEX. Se puede concluir que la optimización en CAPEX de equipos en la solución LA es de más del 50% en comparación con la solución DWDM. Aunque el margen puede ser mayor aun, este valor ya es una referencia de las ventajas de implementación de LA en una red de transporte.

7.3.4.2 Comparativo de OPEX DWDM vs. Lambda Alien.

Para el análisis de costos OPEX del ejemplo, se realiza la estimación de costos OPEX para una red completa DWDM que tienen en operación 2 nodos OTM y 1 nodo OLA, además del costo de mantenimiento de un enlace de fibra óptica de 125km La Paz-Desaguadero. Por otro lado, también se realiza el análisis de costos para la solución LA, considerando solo 2 nodos con transponders en los puntos terminales.

La *primera reducción* de costos OPEX, son para el mantenimiento de nodos, el costo para una red DWDM propia es mayor por la cantidad de nodos (3) y la cantidad de equipos (OTM, OLA), por otro lado, el mantenimiento de la solución LA es menor debido a que solo cuenta con 2 nodos que tienen transponders solamente. Los costos de mantenimiento de fibra óptica de 125km, son uno de los costos que más encarece mantener una red DWDM propia, en la solución LA, directamente este costo es nulo. Para la estimación se considera un costo unitario de 8k USD/Anual para mantenimiento de nodos y un costo de 332 USD/año promedio por mantenimiento de 1km de fibra óptica, estos precios son basados en costos actuales en Bolivia.

La *segunda reducción* de OPEX, es relacionado al tema de repuestos e insumos de fibra óptica, en el caso de una red DWDM propia, se requiere al menos 1 nodo completo del tipo OTM y OLA, además de insumos para la atención de emergencia en la red de fibra, este costo es el segundo más alto que encarece al OPEX, ahora bien, en la solución LA solo se requieren repuestos para los transponder (1 pza) y no se requieren insumos para la atención de emergencia de fibra. Para la estimación se considera el precio de los repuestos igual al precio CAPEX de los nodos OTM, OLA y transponder de la tabla 40 y los insumos el mismo precio que los materiales para implementar FO en la tabla 40, con el factor de inicio $n=5$, es decir 5km de insumos de FO.

La *tercera reducción* de OPEX, es relacionado a los costos de emplazamiento (alquiler, energía) y emplazamiento de la fibra óptica (alquiler de postes, permisos) que son costos que se suman por la cantidad de nodos y cantidad de km de fibra óptica en una red propia DWDM. Para el caso de la solución LA, solo se requiere cubrir costos de emplazamiento para transponders, que son modulares, compactos y de bajo consumo de energía, no hay costo para fibra óptica.

Para la estimación se considera un costo unitario anual de 4k USD para un nodo y en caso del transponder el costo reduce a la mitad, 2k USD respectivamente, son precios de la región.

La *cuarta reducción* de OPEX, es relacionado a los costos de soporte técnico, aunque el costo de soporte depende del tipo de fabricante y cantidad de equipos, como base de este análisis se toma en cuenta el precio unitario anual de 4k USD/nodo, suma el costo de soporte para 2 nodos OTM y 1 nodo OLA en tecnología CIENA, para el caso de la solución LA, el costo reduce en 50% aproximadamente, debido a que se tiene solo 2 módulos o nodos transponders. Además, debido a que no contienen nodos completos OTM, OLA u otros, la complejidad de fallas reduce en comparación con una red DWDM con todos los componentes de la arquitectura.

Costos de Arrendamiento/Alquiler de Lambda: Este costo OPEX es uno de los principales puntos de referencia para el análisis de costos OPEX en la solución LA, debido a que si por una lado se obtiene reducción de costos en CAPEX y OPEX en relación con la implementación de una red DWDM propia, en la solución LA surge un costo anual recurrente dentro del OPEX, que es el costo del alquiler de un lambda en el dominio nativo, si bien el costo de alquiler puede estar condicionado a las características propias y disponibilidad del operador que nos alquilará el lambda (dominio nativo), este costo debe ajustar a los costos utilizados de referencia en circuitos que se alquilan en la misma región.

En el caso de nuestra región Bolivia, podemos tomar como referencia para estimación de costos, el valor que cuesta el alquiler de un circuito de 10Gbps de capacidad entre diferentes regiones y poder definir un promedio de alquiler por km de distancia. Se define una base de circuitos de 10G debido a que aun en nuestra región no está normalizado de forma masiva el uso de puertos de 100G.

El costo promedio de alquiler de un circuito de 10G entre las ciudades de La Paz y Santa Cruz es de 20,000.00 USD/Mes, tomando en cuenta que la distancia promedio entre ambas regiones es de 961,87 km y realizando un análisis de costos anual, como se muestra en la tabla 42, se obtiene un costo anual por kilómetro de 249.51 USD.

Alquiler Circuito (N x Gbps)	Distancia (km)	Costo Promedio Mensual (USD)	Costo Promedio Anual (USD)	Costo Anual/km (USD)
Alquiler Circuito 10G (La Paz-Santa Cruz)	961,87	20,000.00	240,000.00	249.51

Tabla 42 –Análisis de Costos alquiler de un Circuito de 10G en Bolivia.

Fuente: Elaboración propia en base a promedio de costos de alquiler de diferentes proveedores en Bolivia.

Por lo tanto, se plantea el costo referencial para el alquiler de una lambda entre dos puntos en función de la distancia en km como el doble del costo de alquiler anual/km de un circuito de 10G, en base al valor de la tabla 43, el costo de alquiler propuesto por kilómetro es de 500 USD.

Con toda la información anterior, en la tabla 43 se muestra el análisis comparativo de costos OPEX de la red de ejemplo La Paz-Desaguadero, para el costo de monitoreo de red, se realiza una simplificación $OPEX_{MON}=0$, suponiendo ya cuentan con redes NOC en operación.

OPEX	OPEX Red DWDM	QTY	OPEX Anual DWDM (USD)		OPEX Anual Lambda Alien (USD)		Ecuación Costo OPEX
			Costo Unitario	Costo Subtotal	Costo Unitario	Costo Subtotal	
Monitoreo	Monitoreo de Red	3	0.00	0.00	0.00	0.00	$OPEX(mon)$
Mantenimiento	Mantenimiento Nodos	3	8,793.10	26,379.30	4,396.55	8,793.10	$ND \cdot C(mn)$
	Mantenimiento Fibra Óptica (km)	125	332.76	41,595.00	0.00	0.00	$d \cdot C(mfo/km)$
Repuestos	Repuestos Nodo OTM	1	65,156.00	65,156.00	0.00	0.00	$x \cdot C(otm)$
	Repuestos Nodo OLA	1	20,299.00	20,299.00	0.00	0.00	$y \cdot C(ola)$
	Repuesto Transponder	1	0.00	0.00	45,510.00	45,510.00	$x \cdot C(trans)$
	Insumos para Mantenimiento FO	5	2,232.03	11,160.13	0.00	0.00	$n \cdot C(fo/km)$
Emplazamiento	Nodos OTM	2	4,200.00	8,400.00	0.00	0.00	$n \cdot C(eotm)$
	Nodos OLA	1	4,200.00	4,200.00	0.00	0.00	$m \cdot C(eola)$
	Nodo Transponder/Transceiver	2	0.00	0.00	2,100.00	4,200.00	$n \cdot C(etrans)$
	Emplazamiento FO km	125	141.10	17,637.50	0.00	0.00	$d \cdot C(efo/km)$
Soporte	Soporte Técnico	3	4,000.00	12,000.00	2,000.00	4,000.00	$ND \cdot C(ust)$
Arrendamiento	Alquiler de Lambda (125km)	125	0.00	0.00	500.00	62,500.00	$d(RS-SS) \cdot Y$
			OPEX DWDM	206,826.93	OPEX LA	125,003.10	

Tabla 43 –Análisis de Costos OPEX Ejemplo Red La Paz-Desaguadero.

Fuente: Elaboración propia – Datos de precios unitarios y referenciales utilizados: Anexo B.

Con las aclaraciones indicadas anteriormente, en la tabla 44 se muestra el comparativo en resumen de precios OPEX entre la solución DWDM y la solución Lambda Alien para la operación de nuestra red de ejemplo La Paz-Desaguadero.

OPEX	OPEX Red DWDM	QTY	CAPEX DWDM	CAPEX Lambda Alien
Monitoreo	Monitoreo de Red	3	0.00	0.00
Mantenimiento	Mantenimiento Nodos	3	67,974.30	8,793.10
	Mantenimiento Fibra Óptica (km)	125		
Repuestos	Repuestos Nodo OTM	1	96,615.13	45,510.00
	Repuestos Nodo OLA	1		
	Repuesto Transponder	1		
	Insumos para Mantenimiento FO	5		
Emplazamiento	Nodos OTM	2	30,237.50	4,200.00
	Nodos OLA	1		
	Nodo Transponder/Transceiver	2		
	Emplazamiento FO km	125		
Soporte	Soporte Técnico	3	12,000.00	4,000.00
Arrendamiento	Alquiler de Lambda (125km)	125	0.00	62,500.00
		OPEX (USD)	206,826.93	125,003.10

Tabla 44 –Comparativo de Costos OPEX Ejemplo Red La Paz-Desaguadero.

Fuente: Elaboración propia.

Según los costos comparativos OPEX indicados en la tabla 44, se puede apreciar que existe una diferencia de 81,823.83 USD en la solución LA respecto de la solución DWDM, esto representa una reducción de costos de aproximadamente 40% de OPEX Anual recurrente. Este margen de reducción de 40% se puede mejorar tomando en cuenta que para redes punto a punto el mantenimiento se simplifica bastante y en cuanto a los repuestos de la red, si se tienen equipos modulares/compactos, los costos de repuestos se pueden reducir considerablemente.

Adicionalmente a la optimización anual de OPEX en la solución LA, se puede cuantificar la reducción total por el tiempo de operación recomendado y la obsolescencia de la red, tanto en tecnología como capacidad de tráfico de red para la cual fue diseñado, este tiempo se considera a lo largo de 10 años de operación antes de requerir la migración por obsolescencia de la red, esto representa una reducción total de 818,238.28 USD durante el tiempo de operación de la solución lambda alien.

7.3.5 Tasa de retorno de inversión en Lambda Alien.

La tasa de retorno de inversión ROI (Return of Investment) en la implementación de una red DWDM, depende de todos los costos asociados al CAPEX, OPEX y los beneficios obtenidos por la implementación de una red de este tipo, en general podemos asociar de forma anual el valor ROI en la siguiente ecuación:

$$ROI_n = \frac{\sum_1^n BN_n - CAPEX - \sum_1^n OPEX_n}{CAPEX + \sum_1^n OPEX_n} \quad (7.24)$$

Donde:

n es el número de año cumplido donde se calcula el valor de ROI.

BN_n es el valor de beneficio total (ingresos) obtenido en el año “n”, considerando que este valor es el valor de beneficio obtenido (ingreso total anual) del mismo año, este valor es acumulable de forma anual.

CAPEX es el valor de CAPEX invertido de una red DWDM.

OPEX_n es el valor de OPEX recurrente en el año n, considerando que también es un costo acumulable de forma anual.

Para el caso de implementación de la solución LA, existe varias reducciones tanto en CAPEX y OPEX que impactan directamente en el valor de ROI en comparación con una red DWDM propia, brindando una mejora en el ROI, aunque la cuantificación de la mejora de ROI, depende directamente de los costos CAPEX/OPEX y el beneficio obtenido o ingresos a lo largo del tiempo, de forma directa la mejora de CAPEX/OPEX en la solución LA, permitirá mejorar el valor de ROI en comparación con la solución DWDM.

Ya que el valor del cálculo de ROI es en sí un factor de retorno que también puede expresarse en porcentaje %, es útil como referencia para la cuantificación de la mejora de la inversión realizada, el valor de ROI no expresa en si un valor de beneficio actual neto en unidades de costo/beneficio monetario, sino una relación de retorno, por lo cual es un buen indicador para demostrar que es posible mejorar los indicadores ROI, VAN (Valor Actual Neto) de un proyecto con la solución LA.

Ejemplo. - Calculo de ROI en solución DWDM y Lambda Alien: Realizamos el cálculo de retorno de inversión con el ejemplo indicado en el apartado anterior, sobre la necesidad de implementación de una red DWDM de transporte entre La Paz-Desaguadero, en el ejemplo se definieron costo CAPEX/OPEX tanto de la solución DWDM y Lambda Alien, ahora bien, considerando estos costos como la base del cálculo de ROI y para motivos del cálculo de un ROI de 1 en la solución DWDM, determinamos un beneficio total obtenido de alrededor de 1,8M USD en el primer año de operación (n=1), esta suposición es solo para ejemplificar la mejora de ROI con la solución LA, puesto que en realidad este valor depende mucho del tipo de negocio y rentabilidad, el cálculo de VAN, tasa de interés de la inversión y otros factores propios que se analizan en la implementación de un proyecto de aplicación específica.

Para el cálculo de ROI en el ejemplo vamos a utilizar la ecuación 7.24 con n=1, que es el análisis al final del primer año de operación, la ecuación de cálculo es la siguiente:

$$ROI_1 = \frac{BN_1 - CAPEX - OPEX_1}{CAPEX + OPEX_1} \quad (7.25)$$

Además, para ejemplificar el valor del margen de utilidad neta (MUN) del ejemplo, que representa el % de ganancia del beneficio total obtenido durante el primer año de operación, utilizaremos la siguiente ecuación:

$$MUN_1 = \frac{BN_1 - CAPEX - OPEX_1}{BN_1} \quad (7.26)$$

En la tabla 45 se muestra el cálculo de ROI para el ejemplo La Paz-Desaguadero, considerando un ROI de 1 para la solución DWM, es decir que, con el beneficio total obtenido en 1 año de 1,8M USD, al cabo del primer año de operación, tendríamos un retorno de inversión del 1 (100%) es decir duplicaríamos los costos de inversión, se recuperaría los costos de inversión CAPEX/OPEX y además de obtendría una utilidad neta igual al costo de inversión CAPEX/OPEX, con un margen de utilidad neta de 50%. Es decir, los valores de ROI proyectados para la inversión en una red de transporte basado en la solución DWDM que es una red propia, nodos, equipos y red de fibra óptica, tiene un buen resultado de retorno de inversión y margen de utilidad en el proyecto.

El análisis anterior del ejemplo, donde se analiza los beneficios de la solución DWDM, en muchas ocasiones para los operadores representa el punto de decisión, que lleva a un operador de telecomunicaciones a ir por la implementación de una solución DWDM propia, pero vamos ahora a ver como se produce la mejora de los mismos indicadores, siendo que con la implementación la solución LA, el beneficio total obtenido en el primer año de operación es el mismo, puesto que tanto la solución DWDM y LA, entregan técnicamente la misma capacidad de tráfico de red.

Inversión	Tipo	Costo 1er año (USD)	Beneficio 1er año (USD)	ROI 1er año	MUN 1er año (%)
Inversión DWDM	CAPEX	699,066.60	1,811,787.06	1,00	50,00%
	OPEX	206,826.93			
Inversión Lambda Alien	CAPEX	108,427.00	1,811,787.06	6,76	87,12%
	OPEX	125,003.10			

Tabla 45 –Análisis de ROI Ejemplo Red La Paz–Desaguadero.

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de ROI de la solución LA, consideramos también que el beneficio total obtenido en 1 año es de 1,8M USD, al cabo del primer año de operación. Con estos datos el valor de ROI calculado con la ecuación 7.25 es de 6,76, es decir esto significa que se mejora el retorno de inversión por más de 6 veces en comparación con la solución DWDM, esta diferencia es muy considerable y significa también que, al costo de la inversión, el retorno de inversión es del 676%. También esta mejora del ROI se puede interpretar de la siguiente forma:

- Por cada 1 USD que se invierte en el proyecto con solución LA, se obtiene 6.76 USD de utilidad neta (ganancia) más el retorno de la inversión de 1 USD.

Por otro lado, el margen de utilidad neto se incrementa hasta 87,12%, es decir que con la solución LA, tenemos mayor margen de ganancia brindando los mismos servicios, esto significa que al final del año que se obtiene el beneficio total de 1,8M USD, la utilidad neta es de 1,58M USD, es mucho mayor comparado con los 0,9M USD obtenidos en la solución LA.

7.3.6 Reducción de costos en Lambda Alien.

Para realizar un análisis cuantitativo de la reducción de costos, utilizaremos los costos indicados en el ejemplo del apartado 7.3.4. El análisis considera los siguientes casos:

- Reducción de costos CAPEX/OPEX en el primer año de operación. Este análisis es importante ya que es el costo inicial que se requiere para arrancar el proyecto.
- Reducción de costos CAPEX/OPEX después de 10 años de operación. La reducción al final de los 10 años de operación, mostraran si vale la pena realizar la implementación con la solución LA. Consideramos que el OPEX se multiplica por los 10 años.

En la tabla 46 se muestra el cálculo de reducción de costos comparativo entre ambas soluciones para el ejemplo de la red La Paz-Desaguadero:

Inversión	Tipo	Costo 1er año (USD)	Costo 10mo año (USD)	Costo Total 1er año (USD)	Costo Total 10mo año (USD)
Costo DWDM	CAPEX	699,066.60	699,066.60	905,893.53	2,767,335.88
	OPEX	206,826.93	2,068,269.28		
Costo Lambda Alien	CAPEX	108,427.00	108,427.00	233,430.10	1,358,458.00
	OPEX	125,003.10	1,250,031.00		
Reducción de Costos				74,2%	50,9%

Tabla 46 –Reducción de costos Ejemplo Red La Paz-Desaguadero.

Fuente: Elaboración propia.

La reducción de costos en el primer año es de 74,2%, esto es que LA solo requiere un 25,7% de presupuesto en comparación con la solución DWDM, este valor es muy alentador ya que, con un menor presupuesto, LA puede lograr los mismos resultados que una red DWDM propia.

El resultado de reducción de costos en el 10 año de operación es de 50,9%, esto es llegando al final de la vida útil de la solución LA (10 años como tiempo de obsolescencia de una tecnología), la solución LA demuestra que es una alternativa de reducción por un poco más de la mitad del costo total de una red DWDM propia. En caso de que este valor fuera de 0% después de los 10 años, significaría que daría lo mismo implementar LA o DWDM, pero un valor de más de 50% indica que definitivamente la solución LA, es una solución de reducción de costos en la implementación de redes de transporte de alta capacidad.



CAPÍTULO VIII
VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE USO DE LAMBDA
ALIEN

8. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE LAMBDA ALIEN

8.1 Ventajas y desventajas

Las principales ventajas que se tiene con el uso de lambda alien son las siguientes:

1. Intercambio de información a nivel de capa óptica evitando el uso de ancho de banda a nivel de Mbps, esto es una ventaja para el operador que alquila lambda ya que puede llegar a tener una mejor utilización de una lambda que resulta en mayores anchos de banda en comparación del alquiler de un enlace en Mbps. Es decir, logrará una mayor eficiencia de inversión y retorno de la misma. Debido a pagar una tarifa plana para obtener mayor ancho de banda.
2. Escalabilidad. Cuando un operador necesita realizar ampliación de capacidad dentro del espectro alquilado, puede subdividir en portadoras de 50GHz-200GHz para realizar un mejor uso del espectro alquilado, es decir la escalabilidad puede ser realizada dentro de la misma solución LA.
3. Optimización de CAPEX/OPEX, cuando se utiliza la solución LA, la inversión para implementar una red DWDM se reduce drásticamente, siendo que no es necesario la implementación de la capa óptica de multiplexación (Domino Nativo) y tampoco es necesario implementar la capa física de la red de fibra óptica de planta externa. Adicionalmente esto impacta en que los costos asociados al mantenimiento reducen porque son asumidos por el responsable del dominio nativo.
4. Tiempo de Despliegue, considerando un proyecto completo de implementación de una red DWDM propia como solución de conectividad entre dos puntos, los tiempos regularmente son desde 6 meses-2 años considerando la distancia, ancho de banda, redundancia de la red, el tiempo que más largo a considerar es la implementación del enlace de fibra óptica y la construcción de repetidores si fueran necesarios. Ahora bien, en el caso de uso de una solución LA, los tiempos de implementación son significativamente menores ya que no se considera la implementación de fibra óptica,

repetidores y multiplexores, esto resulta que se puede tener un enlace DWDM en menos de 6 meses implementando solamente los transponders en los extremos del enlace nuevo.

5. Del lado del dueño del dominio nativo, es decir el operador que alquila el espectro DWDM en su red, una ventaja importante es que obtiene un mejor uso de su espectro DWDM, es decir puede optimizar su grilla de modo que no tenga canales sin uso y que estén consumiendo recurso de la red, es decir a nivel de uso de espectro todos los equipos funcionan de la misma forma estén ocupando o no los recursos de toda la grilla DWDM de su red. Por lo cual brindar soluciones LA le permite sacar el máximo beneficio de su red instalada.

Entre las principales desventajas del uso de lambda alien se puede mencionar las siguientes:

1. Debido a que en Bolivia no se tienen caso de uso de interconexión a nivel de espectro DWDM y específicamente la solución lambda alien, la negociación de intercambio y acuerdo de precios del alquiler de una lambda, puede ser limitada por factores propios del dueño del dominio nativo y estar en función de los costos asociados a cada operador, esto definitivamente es una desventaja ya que los precios pueden variables en un mismo tramo con diferentes proveedores.
2. El punto anterior puede impactar muchas veces en la decisión de implementación de una red propia vs el uso de LA y además no se puede usar la experiencia para el diseño de nuevas soluciones LA en base a negociaciones anteriores, justamente por casos de uso de referencia.
3. Una desventaja también es el tiempo de retorno de la inversión vs el costo del alquiler a lo largo de los años, si el costo es muy alto, entonces no convendría implementar una solución LA. Ya que el retorno de inversión puede resultar igual o mayor a implementar una red DWDM propia.

8.2 Uso de Lambda Alien en redes DWDM

El uso de lambda alien es una opción rápida de crecimiento de capacidad y reducción de costos como se vio en los apartados anteriores, aunque el uso de esta solución, no está muy allegada a la solución que los operadores brindan en el crecimiento de sus redes, tiene una barrera de la interconexión entre diferentes redes ópticas, con el análisis de las características de la interoperabilidad, la interconexión es posible cumpliendo las características indicadas de sintonización y ecualización de los parámetros ópticos, además con la realización de las pruebas de certificación, es posible en poco tiempo tener una red operativa y lista para cursar gran volumen de tráfico de red.

Aunque los casos de aplicación de lambda alien en Latinoamérica no son conocidos, por referencia de proveedores que implementaron redes DWDM en países de Latinoamérica, el uso ha sido en casos específicos de implementación de redes de transporte en regiones de difícil construcción de redes y/o en casos donde por el valor de VAN, no es conveniente implementar redes DWDM propias. Se tiene información de varios lugares del mundo donde se han hecho laboratorios y puesta en marcha de redes DWDM utilizando lambda alien, además que a nivel de oferta de los proveedores existen varios fabricantes, pero no fabricantes DWDM que ocupan gran parte del mercado, sino, fabricantes de tecnología desagregada, compacta y modular que ofrecen el equipamiento para implementación la solución LA.

En Bolivia no se conoce un caso donde se haya usado la solución lambda (incluso no figura dentro de acuerdo privados o públicos de interconexión), pero es una oportunidad para que pueda figurar como una alternativa de implementación de redes en el entorno local.

Un caso que se puede mencionar como referencia es la implementación de una red DWDM sobre lambda alien en la red de la comunidad educativa y de investigación GARR en Italia, en este caso se realizaron pruebas de operación de interoperabilidad entre equipos HUAWEI en el dominio nativo y equipos INFINERA en el dominio lambda alien. Los resultados fueron exitosos logrando transportar de extremo a extremo 100Gbps. Los detalles de las pruebas se encuentran en el artículo de referencia [16].

8.3 El futuro de la interoperabilidad en redes ópticas.

En el año 2021 varios fabricantes y operadores importantes han lanzado algunos adelantos de los estudios para el desarrollo de soluciones abiertas para la interconexión de capa óptica DWDM. En los siguientes años se complementarán las recomendaciones de parte de la ITU-T que puedan poner todas las especificaciones técnicas necesarias para soluciones abiertas. Una de estas se ha denominado OOLS Open Optical Line System (Sistema Óptico de Línea Abierto).

Unos de los grupos más importantes que ha estado llevando a cabo el desarrollo de estándares abiertos en redes de transporte óptico es la comunidad global denominada “Telecom Infra Project” TIP, que une a varias compañías trabajando en conjunto para acelerar el desarrollo y despliegue de arquitecturas abiertas, desagregadas y soluciones de tecnología estandarizadas para las redes actuales y de las siguientes décadas, los resultados respecto a redes ópticas abiertas está aún en fase de investigación y desarrollo, en 2021 fue emitido un primer avance como meta de la arquitectura.

8.3.1 Open optical line system.

Open OLS tiene las ventajas de interoperabilidad entre diferentes redes DWDM, previene las soluciones DWDM tradicionales con un solo fabricante, permite ciclos de escalamiento más ágiles en cuanto a capacidad de la red, velocidad, reduciendo al igual que la solución LA de gran manera el CAPEX/OPEX requerido y brindando a los operadores la posibilidad de desarrollar redes con la relación más alta de costo-eficiencia y la más alta adaptabilidad posible de una red DWDM.

Adicionalmente algo que añade Open OLS es la desagregación de componentes en los diferentes niveles de la jerarquía OTH, ya que como objetivo de la arquitectura abierta es que a nivel vertical se puedan comunicar diferentes equipamientos de transponders y equipos de capa óptica incluyendo multiplexadores, amplificadores, compensadores y otros, es decir una interoperabilidad vertical tota. La interoperabilidad horizontal que permite la interconexión de diferentes equipamientos en la capa de transponders, multiplexores y componentes de una red DWDM.

Actualmente no es posible que una red DWDM pueda trabajar de forma abierta en su capa óptica de transporte con 2 modelos de equipos de diferentes fabricantes y así mismo los transponders que se diseñan en el dominio LA deben ser del mismo modelo y fabricante.

En la figura 48 se muestra un escenario futuro de la solución Open OLS donde existe una interoperabilidad vertical y horizontal completa para la solución de redes DWDM, aun el camino es largo y se estima que este tipo de soluciones puedan ser implementados y acogidos en los siguientes 10 años.

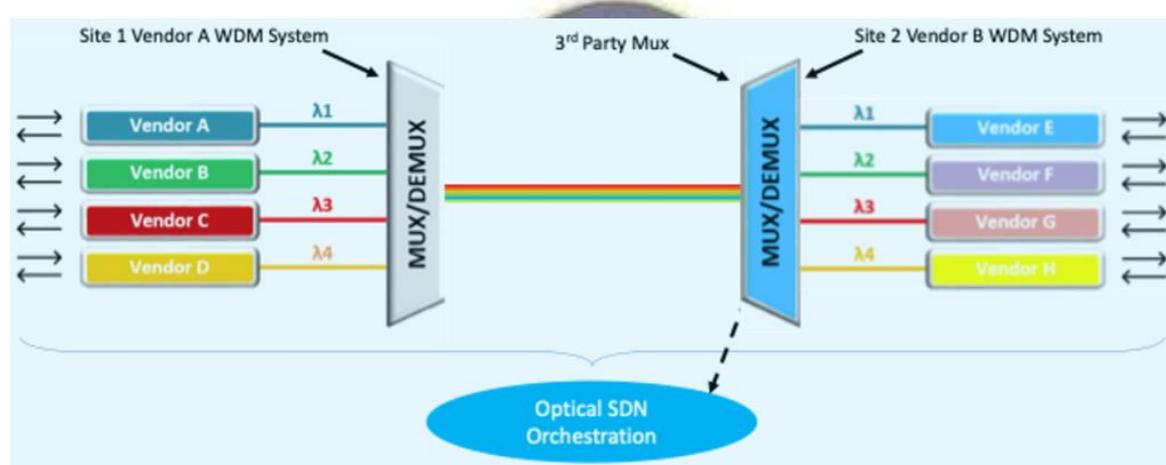


Figura 48 – Escenario futuro de Open OLS para DWDM.

Fuente: World Wide Technology "Should You Implement Optical Open Line Systems and Disaggregation?" [44]

En la figura anterior se puede ver un escenario de interoperabilidad donde se tiene una capa de transponders multi-vendor tanto a nivel de grupo de transponder en un extremo de la red y por el otro extremo la conectividad hacia los transponder que reciben la misma portadora DWDM son también multi-vendor, esto significaría que por ejemplo una señal coloreada λ_3 que pertenece a un transponder de un fabricante C se inyectaría a la capa óptica de multiplexación de un fabricante A para viajar junto con todas las señales multiplexadas hasta un demultiplexor de un fabricante B, finalmente la señal λ_3 es entregada a un transponder de un fabricante G cumpliendo los requerimiento de capacidad de puertos clientes y sus velocidades.

Aunque una de las ventajas de esta solución será que la competencia de precios permitirá a los operadores reducir sus precios en proyectos de nuevas redes DWDM, el reto importante es tener gestión horizontal total de toda la red, para esto es necesario que la gestión también sea

basada en soluciones abiertas, los sistemas de gestión NMS debe utilizar interfaces de programación de aplicaciones abiertas u open APIs (Application Programming Interfaces).

Las ventajas de Open OLS son la reducción de costos e interoperabilidad de la red DWDM, pero en desventajas están que se aumentará la complejidad de la red, la responsabilidad de la operación crece debido a posibles fallos en diferentes capas y es posible que se requiera un OPEX ligeramente mayor debido a requerimiento de diferentes repuestos no reusables en la red y soporte de los fabricantes.

8.3.2 Shared spectrum o espectro alien.

Las características de la solución LA fueron explicadas en detalle en los apartados anteriores, pero como añadidura al concepto de una señal externa que se interconecta a una red DWDM nativa, logrando converger en un medio de transporte de alta capacidad, surgió el concepto de Espectro compartido o Espectro alien (shared spectrum) que amplía el concepto de longitudes de onda alienígenas.

El concepto permite el manejo abierto de un espectro en la capa de transporte óptico en el dominio nativo de la solución LA, no solamente la interconexión en un OCh determinado según la grilla de canales DWDM, sino el uso del espectro compartido de acuerdo a las necesidades propias del dominio LA, se pueden proporcionar más de una longitud de onda en el mismo espectro o varios canales multiportadora aunque esto represente un riesgo de afectación al dominio nativo por no conocer el alcance del uso del espectro que alquila.

En este escenario sería posible alquilar 400GHz de espectro en una red nativa para el uso de 4 portadoras de 100Ghz con diferentes modulaciones, aunque este escenario está aún lejos de un consenso de la industria y fabricantes, es el siguiente paso al desarrollo de soluciones de redes DWDM con sistemas abiertos. Los mismos alcances son aplicables al igual que un sistema Open OLS; interoperabilidad vertical y horizontal, además de la necesidad de un sistema de gestión unificado transversal e independiente de la solución multi-vendor.

The logo of Universidad Mayor Pacensis Divinorum is an oval emblem. The top half features a sun with rays over a mountain range. The bottom half shows a green field with a white cross and a blue star. The text 'UNIVERSITAS MAJOR PACENSIS DIVINORUM' is written around the perimeter of the oval.

CAPÍTULO IX
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

9.1 Conclusiones.

- Se han abordado todas las especificaciones y características de interconexión más importantes para la implementación de una red DWDM con la solución denominada lambda alien, se han descrito los bloques componentes de la solución lambda alien y los parámetros necesarios para el intercambio de señales ópticas, también se han descrito las especificaciones técnicas para la sintonización, la ecualización de los parámetros ópticos y las mediciones necesarias para la certificación de la red y el tráfico que operarán en la solución lambda alien.
- El análisis de costos CAPEX/OPEX indica que la solución lambda alien, permite reducir el CAPEX por más de 80% y el OPEX por más de 35% en el primer año en comparación con el CAPEX/OPEX de una red DWDM propia. La reducción total CAPEX/OPEX en el primer año es más de 70% y al término de 10 años de operación, la reducción aun es mayor del 50% en comparación con la implementación y operación de una red DWDM propia, esto último indica que aun al final de la vida útil de la solución, es mejor implementar la solución lambda alien que una red DWDM propia.
- Las especificaciones de interconexión brindan los parámetros principales entre los puntos de referencia Rs y Ss y permiten la correcta interconexión según el código de aplicación que se utiliza en la solución lambda alien. La información de intercambio de parámetros ópticos entre el dominio nativo y el dominio LA, permiten una interconexión exitosa cuando las mismas se establecen en los rangos permitidos de cada parámetro.
- El ajuste de los parámetros de interconexión en la solución lambda alien es estrictamente requerido con las etapas de sintonización y ecualización de la red, en esta etapa se verifica con diferentes equipos que las mismas estén en los márgenes adecuados y aseguran la interoperabilidad de la solución. Las pruebas de certificación

son las encargadas de validar la correcta adaptación del dominio lambda alien al dominio nativo.

- En Bolivia esta solución no está normada, ni es una práctica de intercambio definida en entre los distintos operadores dominantes, ni secundarios, tampoco se encuentra indicada dentro del alcance de la OBI (oferta básica de interconexión). Por lo cual, el desarrollo de un estudio de las especificaciones de interconexión e interoperabilidad de la solución lambda alien, permitirá considerar los escenarios factibles para un despliegue con lambda alien entre los operadores.
- En relación al retorno de inversión en la solución lambda alien, el ejemplo demostró que la mejora de ROI en referencia a un valor de 1 para una solución DWDM, es de más de 6 veces, es decir una mejora de 600% al retorno de inversión y una mejora del margen de utilidad neta de 50% a más de 87% en la solución lambda alien. Esto hace a la solución Lambda Alien una alternativa muy importante a considerar en la implementación de redes de transporte de alta capacidad.

9.2 Recomendaciones.

- Se recomienda el uso de la solución lambda alien como un paso hacia la tendencia global del uso de tecnologías abiertas, como se indicó en el apartado 8.3, en la actualidad la interconexión de redes de diferentes tecnologías, están en fase de investigación, desarrollo y difusión, se espera que en los próximos 10-15 años, se tengan mayores especificaciones y fabricantes de soluciones abiertas, una forma de alentar a esto ahora, es el uso de la solución lambda alien en redes DWDM de los operadores actuales, lo cual hace que los fabricantes terminen de adoptar y permitir de forma nativa la interconexión de redes de diferentes naturalezas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1] Herve LE BRIS – EFORT. “*Backhauling*”. Artículo sobre redes cableadas DSL y GPON, en fibra óptica. Página Web: <http://www.efort.com>. 2010. pp 2-3.
- [2] Leonardo Uzcategui, Javier Triviño. “*NGN Next Generation Network*”. Presentación de tecnologías NGN. 2005. pp 20-49.
- [3] Cisco Visual Networking Index. “*Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2012-2017*”. White Paper Cisco Inc., February 6, 2013. pp 4-10.
- [4] Fundación OPTI Observatorio de Prospectiva Tecnológica Industrial. “*Tendencias futuras de conectividad en entornos fijos, nómadas y móviles*”. España 2010. pp 3-6.
- [5] Mediatecom Policy & Law. “*Spectrum Crunch a la vuelta de la esquina- Tendencias en crecimientos de datos móviles*”. Mayo 2013. pp 4-8.
- [6] Huawei Technologies Co., LTD., “*Choosing the right technology for mobile backhaul evolution*”, Comunicate, 2009. pp 5-15.
- [7] Alcatel Lucent. Next Generations Communications. “*Deploying IP/MPLS in Mobile Networks*”. End to End IP Transformation Featured Article. 2010. pp 2-5.
- [8] Alberto Montilla. “*Arquitectura de Red de acceso móvil de cuarta generación*”. Departamento de Ingeniería Telemática. Madrid, Julio 2009. pp 29-79.
- [G.709] ITU-T Recommendation G.709: “*Interfaces for the Optical Transport Network (OTN)*”, March 2003.
- [9] Duilio Arnulfo Buevas Peñarredonda, Ivan Dario Tellez, Edgar Amado Mateus. “REDES ÓPTICAS DWDM: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DWDM OPTICAL NETWORKS: DESIGN AND IMPLEMENTATION”. Revista Visión Electrónica. Año 4. No. 1. Junio 2010. pp. 70-80
- [10] Tutorials Of Fiber Optic Products. “Introduction to WDM Transponder”. Página web: <http://www.fiber-optic-tutorial.com/wdm-transponders.html>. Fecha de consulta: 21/09/2020.
- [11] “*FOM (Figure of Merit) for dark fiber links*” (PDF). SURFnet, 5th Customer Empowered Fibre networks meeting, Prague. Retrieved 2009-05-15.
- [12] China Cables Supplier. “DWDM multi.channel Mux/Demux”. Página web: <http://www.china-cable-suppliers.com/bi-directional-dwdm-operation>. Fecha de consulta: 21/09/2020.
- [13] Pedro Ignacio Sequeira. “*Estudio de la interoperabilidad entre distintos equipamientos DWDM*”. Trabajo final de integrador. Instituto Tecnológico de Buenos Aires. 2017.
- [14] “*What should the OSNR values be in DWDM networks?*” <https://www.exfo.com/es/recursos/blog/osnr-values-dwdm-networks/>. Diciembre 6, 2012. Fecha de consulta: 15/10/2020.
- [15] “*Alcatel-Lucent 1350 OMS Optical Management System Unified optics management to accelerate ROI and improve OPEX*” https://www.academia.edu/12941814/Alcatel-Lucent_1350_OMS_Optical_Management_System_Unified_optics_management_to_accelerate_ROI_and_improve_OPEX 2009.
- [16] Paolo Bolletta, Massimo Carboni, Andrea Di Peo, Americo Gervasi, Lorenzo Puccio, Gloria Vuagnin. “*ALIEN WAVELENGTH TECHNIQUE TO ENHANCE GARR OPTICAL NETWORK*” GARR - The Italian Research and Education Network, Rome, Italy. INFN, National Laboratory of Frascati, Rome, Italy.
- [17] Jhon Jairo Padilla Aguillar, PHD. “*Ingeniería de Tráfico*”. Página Web: http://jpadilla.docentes.upbbga.edu.co/Network_routing/9-Ingenier%C3%ADa%20de%20tr%C3%A1fico.pdf Fecha de consulta: 21/01/2022.

- [18] Blog de Risoul. “Beneficios del modelo jerárquico de 3 capas en redes Industriales”. Publicación: 2 abril 2021. Fecha de Consulta: 23/01/2022.
- [19] Carlos M. Martínez-Cagnazzo, Antel, Uruguay. “Consideraciones Para el Diseño de una Red de Backbone Multiservicio” Artículo Publicado en: https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2013-07-27_12-25-48mvdtecom-009.pdf Fecha de consulta: 23/01/2022.
- [20] Wikipedia. “Ley de Snell” Página Web: https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Snell Fecha de Consulta: 28/01/2022
- [21] FS Community. “Types of Optical Fiber Dispersion and Compensation Strategies | FS Community” Página Web: <https://community.fs.com/blog/types-of-optical-fiber-dispersion-and-compensation-strategies.html> Fecha de consulta: 29/01/2022.
- [22] Caracterización de fibras ópticas: PMD y CD “Caracterización de fibras ópticas: PMD y CD (2) Grupo COFTTEL (c3comunicaciones.es)” Página Web: <https://www.c3comunicaciones.es/caracterizacion-de-fibras-opticas-2/> Fecha de consulta: 29/01/2022
- [23] Water-Peak Meaning. “Water-peak Meaning | Best 1 Definitions of Water-peak (yourdictionary.com)” Página Web: <https://www.yourdictionary.com/water-peak> Fecha de consulta: 29/01/2022
- [24] Monografías. “Transmisión por fibra óptica” Página Web: <https://www.monografias.com/trabajos108/transmision-fibra-optica/transmision-fibra-optica2> Fecha de consulta: 29/01/2022
- [25] Medium.com Artículo de Don Juan “Fundamentos de la tecnología WDM: Diferencia entre la tecnología CWDM y DWDM” Página Web: <https://xxxamin1314.medium.com/fundamentos-de-la-tecnolog%C3%ADa-wdm-diferencia-entre-la-tecnolog%C3%ADa-cwdm-y-dwdm-9ed16b22a0a9> Fecha de consulta: 30/01/2022
- [26] Artículo FOCC Fiber Optic CO. “DIVISIÓN DE LARGO DE ONDA GRUESO Y DENSO MULTIPLEXIÓN” Página Web: <http://www.fibresplitter.com/info/coarse-and-dense-wavelength-division-multiplex-39693031.html> fecha de consulta:31/01/2022
- [27] Recomendación ITU-T G.694.1 - SERIE G: SISTEMAS Y MEDIOS DE TRANSMISIÓN, SISTEMAS Y REDES DIGITALES “Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda: Plan de frecuencias con multiplexación por división de longitud de onda densa” Publicación: Junio 2002.
- [28] Cisco. “Cisco Transport Planner: Optical Network Design Tool for Cisco ONS 15454 MSTP” Página Web: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/optical-networking/ons-15454-series-multiservice-transport-platforms/data_sheet_c78-658849.html Fecha de consulta: 05/02/2022.
- [29] Ciena. “PlannerPlus Automated capacity management for optimized network designs” Página web: PlannerPlus - Ciena <https://www.ciena.com/insights/data-sheets/plannerplus.html> Fecha de consulta: 05/02/2022.
- [30] CRT. “Herrajes para Cables” Página Web: <http://www.crttele.com/productos/herrajes-de-fijacion.html> Fecha de consulta: 05/02/2022.
- [31] Sisutelco. “Estándares Fibras ópticas monomodo y multimodo” Página web: <https://sisutelco.com/estandares-fibras-opticas/> Fecha de consulta: 05/02/2022.
- [32] Fibra Market. “CAJAS DE EMPALME – CIERRES DE EMPALME” Página web: <https://www.fibramarket.com/cajas-de-empalme/> Fecha de consulta: 05/02/2022.

- [33] PRORED. “¿Qué es la dispersión cromática de la fibra óptica?” Página Web: <https://www.prored.es/la-dispersion-cromatica/> Fecha de consulta: 06/02/2022.
- [34] Hugo Zamora Farias. “DISPERSIÓN POR MODO DE POLARIZACIÓN (PMD) EN REDES TRONCALES DE FIBRA OPTICA” Página Web: <http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/619/620/621/3613.pdf> Fecha de Consulta: 06/02/2022.
- [35] Tomáš Huszaník, Ján Turán and Luboš Ovseník. “On the 100 Gbps DWDM with Optical Carrier Suppression Modulation” Página Web: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/comp-2020-0104/html> Fecha de Consulta: 07/02/2022.g
- [36] Telecommunication Engineering Centre, India. “Study Paper on Evolution of High Capacity Optical Transport Network” Página web: <https://www.tec.gov.in/pdf/Studypaper/Study%20paper%20on%20Evolution%20of%20High%20Capacity%20Optical%20Network%20Final.pdf> Fecha de consulta: 14/02/2021
- [37] Tecnologías Fiberhome. “DWDM Multiplexacion por división de longitud de onda densa” Página web: <https://docplayer.es/456373-Dwdm-multiplexacion-por-division-en-longitud-de-onda-densa.html> Fecha de consulta: 23/02/2022
- [38] CIENA. “How pluggables fit into Ciena’s coherent optical investment strategy - Ciena” Pagina Web: <https://www.ciena.com/insights/articles/ciena-coherent-optical-strategy-pluggables-and-performance.html> fecha de consulta: 24/02/2022
- [39] Artículo HISILICON. “400G All-Scenario Optical Modules White Paper” Página web: <https://www.o.hisilicon.com/oe/Media-Center/TechTalk/400G-All-Scenario-Optical-Modules-White-Paper> fecha de consulta: 24/02/2022
- [40] FS Community. “DWDM Mux/Demux Overview-Working Principle and Different Types | FS Community” Página Web: <https://community.fs.com/blog/dwdm-mux-demux-overview-working-principle-and-different-types.html> Fecha de consulta: 26/02/2022.
- [41] Revista Ingenium, Facultad de Ingeniería San Buena Ventura. Colombia. “Dispositivos de conmutación óptica en redes de nueva generación” Página Web: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewjZrrX155_2AhW7ILkGHXoHBlkQFnoECAUQAO&url=https%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F5038470.pdf&usg=AOvVaw3aeyAJrAocatFPytJjPmOZ Fecha de consulta: 27/02/2022.
- [42] Test Happens, Blog Teledyne Lecroy. “Performance Considerations For Optical Modulation Analysis” Página Web: <https://blog.teledynelecroy.com/2016/03/performance-considerations-for-optical.html> Fecha de consulta: 9/3/2022
- [43] CEPETEL. Sindicato de los Profesionales de las Telecomunicaciones. Ing. Eduardo Sposato, Ing. Claudio Saenz. “Tecnología DWDM-OTN ITU-T G.709” Junio 2020. Página Web: <https://www.cepetel.org.ar/wp-content/uploads/2021/07/Curso-d-Backhaul-y-Metroethernet-Modulo-DWDM-.pdf> Fecha de consulta: 25/03/2022.
- [44] World Wide Technology. Tyler Tappy-Technical Solutions Architect-Optical Networking. “Should You Implement Optical Open Line Systems and Disaggregation? - WWT” Enero 2021. Página Web: <https://www.wwt.com/article/should-you-implement-optical-open-line-systems-and-disaggregation> Fecha de consulta: 27/03/2022.

- [45] SCTE · ISBE 2019. Michael Ting Wang, P.Eng. 2019 Fall Technical Forum. “*Disaggregated, Coherent DWDM Solution at Shaw’s Newest Cloud Datacentre Interconnect*” Fecha de consulta: 28/03/2022.
- [46] Folleto de Producto. 6500 Packet-Optical Platform “*Folleto del producto 6500 Packet-Optical Platform de Ciena*” Creando las bases para una estructura programable. Página Web: https://www.ciena.com/data/assets/pdf/file/0025/53647/6500_Packet_Optical_Platform_A4_PB_es_LA.pdf Fecha de Consulta: 03/03/2022.
- [47] Blog Worldwide Supply.”*PAM4 vs. Coherent Optics - Comparison | Worldwide Supply*” Pagina web: <https://worldwidesupply.net/blog/pam4-vs-coherent-optics/> Fecha de consulta: 16/04/2022.
- [48] White Paper EXFO. Jean-Sébastien Tassé, Product Manager, Optical Business Unit, EXFO. “*40G/100G/200G OSNR Measurements with a Pol-Mux OSA*” Página Web: https://www.optoscience.com/maker/exfo/lth_platform/pdf/EXFO_wpapero28_40G-100G-OSNR-Measurements-Pol-Mux-OSA_en.pdf#:~:text=The%20Pol-Mux%20OSA%20then%20performs%20the%20Pol-Mux%20OSNR,OSA%3B%20however%2C%20this%20procedure%20is%20long%20and%20tedious. Fecha de Consulta: 02/05/2022.
- [49] Página Venta de SFP, PVL. “*MÓDULO SFP MONOMODO 1310NM 10KM CONECTOR LC DUPLEX, UNIVIEW SFP-GE-LX-SM1310-UV*” Página Web: <https://pvl.com.bo/producto/modulo-sfp-monomodo-1310nm-10km-conector-lc-duplex-uniview-sfp-ge-lx-sm1310uv/> Fecha de Consulta: 06/06/2022.
- [50] Lightwave. Network Design. DWDM & ROADM. “*Third-generation DWDM networks near reality*”. Página Web: <https://www.lightwaveonline.com/network-design/dwdm-roadm/article/16647334/thirdgeneration-dwdm-networks-near-reality> Fecha de consulta: 03/07/2022.
- [51] Datasheet de equipos, tarjetas DWDM en Tecnología ZTE. “*ZXONE 9700 Product Description*”. Página Web: <https://es.scribd.com/document/416708981/ZXONE-9700-Product-Description-20170821> Fecha de consulta: 23/07/2022.

ANEXOS.

Anexo A- Detalle de costos CAPEX para implementación de equipos en tecnología CIENA e Implementación de una red de Fibra Óptica entre La Paz y Desaguadero.

CAPEX	CAPEX Red DWDM	Modelo	Cantidad	Costo Unitario USD	Costo Sub Total USD	Costo Total USD
Equipos CIENA	Nodos OTM	Chasis 6500-D7/S8	1	7,230.00	7,230.00	65,156.0
		Transponder 100G WL3n MOTR	1	35,750.00	35,750.00	
		Mux/Demux 4 Channel SCMD4	1	13,225.00	13,225.00	
		Amplificador FGA-C-BAND	4	2,237.75	8,951.00	
	Nodos OLA	Chasis 6500-D7/S8	1	7,230.00	7,230.00	20,299.0
		Amplificador FGA-C-BAND	2	2,237.75	4,475.50	
		Filtro CN-100-C4L 4-CH 100GHZ	4	2,148.38	8,593.52	
	Transponder/ Transceiver	Chasis 6500-D7/S8	1	5,528.00	5,528.00	45,510.0
		Transponder 100G WL3n MOTR	1	39,982.00	39,982.00	
		Diseño, instalación, configuración (*)	1	1	81,401.00	81,401.00

(*) El precio de instalación y configuración de la red, depende de cada fabricante o proveedor, el mismo está sujeto a negociación en cada proyecto.

Nota: Todos los precios son considerados con IVA de proveedores en el mercado Boliviano (costos referenciales promedio)

Tabla 1 Anexo A – Costos CAPEX de equipos e instalaciones de equipos DWDM CIENA.

Fuente: Costos referenciales de un proyecto implementado por un operador de servicios en Bolivia.

Costo CAPEX para implementación de Fibra Óptica de 125km entre La Paz y Desaguadero, considerando los puntos inicial, el centro de La Paz y punto final la población de Desaguadero:

CAPEX	CAPEX Red DWDM	Descripción / Detalle	Costo DWDM (USD)	
			Costo Unitario USD	Costo Total USD
Fibra Óptica	Ingreso a nodos (1 Nodo)	EJECUCION DE EMPALME DE TERMINACION EN SUB-BASTIDOR PARA CABLE F.O.	126.2	199.10
		INSTALACIÓN DE ACCESORIOS PARA SUBIDA LATERAL	44	
		INSTALACION INTERNA DE ACCESORIOS EN SHELTER	28.9	

Nota: Todos los precios son considerados con IVA de proveedores en el mercado Boliviano (costos referenciales promedio)

Tabla 2 Anexo A – Costos CAPEX de instalación de fibra óptica en un nodo.

Fuente: Costos referenciales promedio de diferentes proveedores dominantes en el mercado Boliviano.

CAPEX	CAPEX Red DWDM	Descripción / Detalle	Cantidad	Costo Unitario USD	Costo Sub Total USD	Costo Total USD
Fibra Óptica	Material Fibra óptica e accesorios 125 km Fibra Óptica de 24 Hilos G652d	POSTE HoAo DE 9 m.	46.00	223.90	10,299.40	279,003.20
		POSTE HoAo DE 12 m.	7.00	505.70	3,539.90	
		POSTE DE MADERA TRATADA DE 9 m	764.00	106.00	80,984.00	
		ACCESORIOS POSTE TERMINAL DUPLO	840.00	30.00	25,200.00	
		ACCESORIOS POSTE TERMINAL	54.00	30.00	1,620.00	
		ACCESORIOS POSTE DE PASO	110.00	12.49	1,373.90	
		ACCESORIOS PARA POSTE DE PASO CON BRAZO DE EXTENSIÓN	6.00	35.41	212.46	
		ACCESORIOS PARA RIENDA DE POSTE	1.00	28.20	28.20	
		ACCESORIOS PARA RESERVA DE FIBRA ÓPTICA	50.00	72.78	3,639.00	

		ACCESORIOS PARA SUBIDA LATERAL	0.00	38.10	0.00
		CABLE DE 24 FIBRAS ADSS AEREO (m)	125,000.00	1.20	150,000.00
		PROVISION DE SUB-BASTIDOR (ODF) PARA INDOOR 24 FIBRAS OPTICAS	2.00	651.60	1,303.20
		PROVISION DE ADAPTADOR LC/PC	48.00	9.50	456.00
		PROVISION DE PIG-TAIL CONECTORIZADO LC/PC de L = 1,5 m.	48.00	7.30	350.40

Nota: Todos los precios son considerados con IVA de proveedores en el mercado Boliviano (costos referenciales promedio)

Tabla 3 Anexo A – Costos CAPEX de material para 125km de tendido de fibra óptica.

Fuente: Costos referenciales promedio de diferentes proveedores dominantes en el mercado Boliviano.

CAPEX	CAPEX Red DWDM	Descripción / Detalle	Cantidad	Costo Unitario USD	Costo Sub Total USD	Costo Total USD
Fibra Óptica	Instalación de Fibra Óptica 125 (km) Cable de 24 hilos G652d	DISEÑO DEL PROYECTO E IMPRESION DE PLANOS PARA CONSTRUCCION	108,534.00	0.30	32,560.20	187,255.00
		ELABORACION DE PLANOS AS BUILT	108,534.00	0.10	10,853.40	
		INSTALACIÓN DE POSTE DE HORMIGÓN ARMADO PRETENSADO DE 9 m	46.00	70.00	3,220.00	
		INSTALACIÓN DE POSTE DE HORMIGÓN ARMADO PRETENSADO DE 12 m	7.00	150.60	1,054.20	
		INSTALACIÓN DE POSTE DE MADERA TRATADA DE 9 m	848.00	60.04	50,915.62	
		INSTALACIÓN DE ACCESORIOS POSTE TERMINAL DUPLO	991.00	7.00	6,937.00	
		INSTALACIÓN DE ACCESORIOS POSTE TERMINAL	54.00	7.00	378.00	
		INSTALACIÓN DE ACCESORIOS POSTE DE PASO	110.00	7.00	770.00	

INSTALACIÓN DE ACCESORIOS PARA POSTE DE PASO CON BRAZO DE EXTENSIÓN	6.00	7.50	45.00
INSTALACIÓN DE ACCESORIOS PARA RESERVA DE FIBRA ÓPTICA	142.00	10.00	1,420.00
INSTALACION DE CABLE DE 24 FIBRAS ADSS AEREO (m)	125,000.00	0.43	53,750.00
EJECUCION DE EMPALME SIN DERIVACION PARA F.O.	24.00	689.50	16,548.00
PROVISION DE SUB-BASTIDOR (DIO) PARA INDOORS 24 FIBRAS	2.00	148.90	297.80
PROVISION DE ADAPTADOR LC/PC	48.00	1.50	72.00
PROVISION DE PIG-TAIL CONECTORIZADO LC/PC de L = 1,5 m.	48.00	1.50	72.00
PRUEBA DE RETRODIFUSION BIDIRECCIONAL DE F.O. 24	96.00	23.90	2,294.40
GESTION DE PERMISOS Y RECORRIDO DEL TRAZADO CON PERSONAL DE LA EMPRESA PROPIETARIA DE LOS POSTES	1.00	1,449.50	1,449.50
TRANSPORTE DE MATERIALES Y PERSONAL PARA INSTALACION	1.00	4,618.30	4,618.30

Nota: Todos los precios son considerados con IVA de proveedores en el mercado Boliviano (costos referenciales promedio)

Tabla 4 Anexo A – Costos CAPEX de mano de obra para instalación de 125 km de fibra óptica.

Fuente: Costos referenciales promedio de diferentes proveedores dominantes en el mercado Boliviano.

Anexo B- Detalle de costos OPEX para el mantenimiento de una red DWDM entre La Paz
- Desaguadero.

OPEX Red DWDM	Descripción / Detalle	Cantidad	Costo Unitario USD Mensual	Costo Unitario USD Anual	Costo Sub Total USD	Costo Total USD Anual
Monitoreo de Red	NOC (se considera un NOC ya en operación, por lo que el costo es cero)	3	0.00	0.00	0.00	0
Mantenimiento Nodos	Costo Operativo por Mantenimiento de 1 Nodo	3	86.21	1,034.48	3,103.45	26,379.31
	Sereno del Nodo Desaguadero	1	646.55	7,758.62	7,758.62	
	Técnicos, Herramientas y Equipos de medición	1	1,293.10	15,517.24	15,517.24	
Mantenimiento Fibra Óptica km	Costo Operativo de FO por km	125	9.34	112.07	14,008.62	41,594.83
	Técnicos, Herramientas y Equipos de medición	1	1,293.10	15,517.24	15,517.24	
	1x Vehículo 4x4 para atención de fallas (Alquiler)	1	1,005.75	12,068.97	12,068.97	
Repuestos Nodo OTM	Chasis 6500-D7/S8	1	n/a	7,230.00	7,230.00	65,156.0
	Transponder 100G WL3n MOTR	1	n/a	35,750.00	35,750.00	
	Mux/Demux 4 Channel SCMD4	1	n/a	13,225.00	13,225.00	
	Amplificador FGA-C-BAND	4	n/a	2,237.75	8,951.00	
Repuestos Nodo OLA	Chasis 6500-D7/S8	1	n/a	7,230.00	7,230.00	20,299.0
	Amplificador FGA-C-BAND	2	n/a	2,237.75	4,475.50	
	Filtro CN-100-C4L 4-CH 100GHZ	4	n/a	2,148.38	8,593.52	
Repuesto Transponder	Chasis 6500-D7/S8	1	n/a	5,528.00	5,528.00	45,510.0
	Transponder 100G WL3n MOTR	1	n/a	39,982.00	39,982.00	
Insumos para Mantenimiento FO	Costo de insumo de 1 km según precio unitario por km tabla 40. Total 5 km anual	5	n/a	2,232.03	11,160.13	11,160.13

Nota: Todos los precios son considerados con IVA de proveedores en el mercado Boliviano (costos referenciales promedio)

Tabla 1 Anexo B – Detalle de costos OPEX operación y mantenimiento de 125 km de FO.

Fuente: Costos referenciales promedio de diferentes proveedores dominantes en el mercado Boliviano.

OPEX Red DWDM	Descripción / Detalle	Cantidad	Costo Unitario USD Mensual	Costo Unitario USD Anual	Costo Sub Total USD	Costo Total USD Anual
Nodos OTM	Costo de alquiler de un nodo (incluye alquiler de emplazamiento y energía eléctrica promedio de una estación en la ciudad de La Paz)	2	350.00	4,200.00	8,400.00	8,400.00
Nodos OLA		1	350.00	4,200.00	4,200.00	4,200.00
Nodo Transponder/ Transceiver		2	175.00	2,100.00	4,200.00	4,200.00
Emplazamiento FO km	Tarifa de alquiler de uso de postes de DELAPAZ en la ruta La Paz - Desaguadero por km de Fibra Óptica (más de 1000 postes en la ruta)	125	11.76	141.10	17,637.50	17,637.50
Soporte Técnico	Costo Promedio de Soporte de CIENA	3	333.33	4,000.00	12,000.00	12,000.00

Nota: Todos los precios son considerados con IVA de proveedores en el mercado Boliviano (costos referenciales promedio)

Tabla 2 Anexo B – Detalle de costos OPEX de emplazamientos y soporte técnico de una red DWDM.

Fuente: Costos referenciales promedio de diferentes proveedores dominantes en el mercado Boliviano.

Nombre del Autor: Ing. Oscar Angel Valencia Cruz

Correo electrónico: ovc.etn@gmail.com

Teléfono: +591 64110033



2023-TTES-364-D-1

**DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-1198/2023
La Paz, 11 de Mayo del 2023**

VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha 5 de Mayo del 2023, por **OSCAR ANGEL VALENCIA CRUZ** con C.I. N° 6137941 LP, con número de trámite DA 593/2023, señala la pretensión de inscripción de la Tesis de Post-Grado titulada: "ESPECIFICACIONES PARA LA INTERCONEXIÓN E INTEROPERABILIDAD EN REDES DWDM A NIVEL DE TRANSPORTE DE CAPA ÓPTICA LAMBDA ALIEN", cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

CONSIDERANDO

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el "Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración".

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece "Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión". En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: "la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios".



Oficina Central - La Paz
Av. Montes, N° 515,
entre Esc. Uruguay y
C. Batallón Mlamar.
Telfs.: 2195700 - 2194276
2194551 Fax: 2195700

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
prolongación Quijarro,
N° 29, Edif. Bicentenario.
Telfs.: 3521752 - 72042936

Oficina - Cochabamba
Calle Bolívar, N° 737,
entre 16 de Julio y Antezana.
Telfs.: 4244403 - 72042957

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, N° 2560
Edif. Multicentro El Ceibo
Ltda. Piso 2, Of. 5B,
zona 16 de Julio.
Telfs.: 7244001 - 72043029

Oficina - Chuquisaca
Calle Kilómetro 7, N° 366
casí esq. Urriagotia,
zona Parque Bolívar.
Telf.: 72005873

Oficina - Tarija
Av. La Paz, entre
Calle Ciro Trigo y Avaroa
Edif. Santa Clara, N° 243.
Telf.: 72015286

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre,
N° 5877, entre Ayacucho
y Junín, Galería Central,
Of. 14 (Ex Banco Fie).
Telf.: 6220288

Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Wenceslao Alba y San Alberto,
Edif. AM. Salinas N° 242,
Primer Piso, Of. 17.

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley Nº 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: *"...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial"*.

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: *"... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ..."*, por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

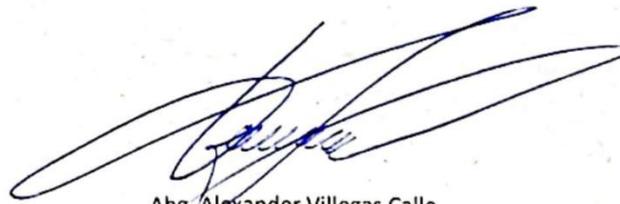
POR TANTO

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas

RESUELVE:

INSCRIBIR en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, la Tesis de Post-Grado titulada: **"ESPECIFICACIONES PARA LA INTERCONEXIÓN E INTEROPERABILIDAD EN REDES DWDM A NIVEL DE TRANSPORTE DE CAPA ÓPTICA LAMBDA ALIEN"**, a favor del autor y titular: **OSCAR ANGEL VALENCIA CRUZ** con C.I. Nº **6137941 LP**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.



Abg. Alexander Villegas Calle
**DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS a. i.**
SERVICIO NACIONAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL



AVC/mnct
c.c.Arch.

Oficina Central - La Paz
Av. Montes, Nº 515,
entre Esq. Uruguay y
C. Batallón Illimani.
Telfs.: 2115700 - 2119276
2119251 Fax: 2115700

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
prolongación Quijarro,
Nº 29, Edif. Bicentenario.
Telfs.: 3121752 - 72042936

Oficina - Cochabamba
Calle Bolívar, Nº 737,
entre 16 de Julio y Antezana.
Telfs.: 4141403 - 72042957

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, Nº 2560
Edif. Multicentro El Ceibo
Ltda. Piso 2, Of. 58,
zona 16 de Julio.
Telfs.: 2141001 - 72043029

Oficina - Chuquisaca
Calle Kilómetro 7, Nº 366
casi esq. Urrutigoitia,
zona Parque Bolívar.
Telf.: 72005873

Oficina - Tarija
Av. La Paz, entre
Calles Oro Trigo y Avaroa
Edif. Santa Clara, Nº 243.
Telf.: 72015286

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre,
Nº 5837, entre Ayacucho
y Jumin, Galería Central,
Of. 14 (Ex Banco Fie).
Telf.: 67201288

Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Wenceslao Alba y San Alberto,
Edif. AM. Salinas Nº 342,
Primer Piso, Of. 17.