



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

**CONFIGURACIÓN, PRUEBA Y ANÁLISIS DE SERVICIOS ASON
CON MAQUETA DWDM EN LABORATORIO**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

PRESENTA:

ALAN GUERRERO DÍAZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. MIGUEL MOCTEZUMA FLORES

**CIUDAD UNIVERSITARIA
15/DICIEMBRE/2015**





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, Esperanza Díaz Guzmán, por su incansable apoyo, amor y cariño brindados durante mi formación académica.

A mi padre, Víctor Manuel Guerrero Zamudio, por su apoyo incondicional, amor y cariño brindados durante mi formación académica.

A mi director de tesis, el Dr. Miguel Moctezuma, por creer en mi proyecto, brindarme su confianza y apoyarme tanto en la elaboración como en la culminación de este proyecto.

A mis sinodales, por amablemente aceptar ser parte de mi jurado.

A mi hermano Hugo, por ayudarme en mis tareas de cálculo diferencial y por haberme compartido sus recursos de cómputo durante mi formación académica.

A mi hermano Víctor, por su apoyo moral en momentos clave de mi vida.

A Diana, por su apoyo moral y compañía durante todos esos fines de semana en los que fue escrita esta tesis.

Al Dr. Volodymyr Svyrid, por haberme enseñado las bases teóricas y prácticas de los sistemas de comunicaciones ópticas.

A Azael, por haberme enseñado las bases teóricas y prácticas de la industria de las telecomunicaciones.

A James, por haber sido un gran maestro y amigo.

A Iván, por haber apoyado con el ejemplo.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	10
OBJETIVOS	11
CAPÍTULO 1: REDES DWDM TRADICIONALES	12
1.1.: DWDM Tradicional	12
1.1.1.: Principio de funcionamiento de la tecnología DWDM	13
1.1.2.: Elementos DWDM	18
1.1.3.: Redes DWDM	27
1.1.4.: Norma OTN	29
1.2.: Protecciones Tradicionales DWDM	36
1.2.1.: Protección de Línea Óptica	36
1.2.2.: ODUK-SNCP	37
CAPÍTULO 2: RED ÓPTICA DE CONMUTACIÓN AUTOMÁTICA (ASON)	39
2.1.: Teoría ASON	40
2.2.: Tipos de servicios ASON	52
CAPÍTULO 3: MAQUETA DE PRUEBAS	56
3.1.: Construcción de la red OTN+ASON de pruebas	57
3.2.: Configuración de la red OTN+ASON de pruebas	65
3.3.: Configuración de servicios OTN+ASON en maqueta de pruebas	68
CAPÍTULO 4: PROTOCOLO DE PRUEBAS	73
4.1.: Pruebas con servicio Diamond	74
4.1.1.: Escenario 1	74
4.1.2.: Escenario 2	76
4.1.3.: Escenario 3	78
4.2.: Pruebas con servicio Silver	80
4.2.1.: Escenario 1	80
4.2.2.: Escenario 2	82
4.2.3.: Escenario 3	84
4.3.: Pruebas con servicio Cooper	87
4.3.1.: Escenario 1	87
CAPÍTULO 5: RESULTADOS	89
CONCLUSIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	95
GLOSARIO	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Espectro Electromagnético.	13
Figura 2: Principio de funcionamiento de la tecnología WDM.	14
Figura 3: Ejemplos de sistemas de comunicaciones ópticas con WDM.	15
Figura 4: Comparativo de los 4 esquemas de espaciado intercanal definidos por ITU-T.	17
Figura 5: Aplicación de los Amplificadores Ópticos.	18
Figura 6: Comparativo de Amplificadores Ópticos de acuerdo con su banda de operación.	19
Figura 7: Aplicación de los Compensadores de Dispersión Cromática.	20
Figura 8: Multiplexor DWDM.	21
Figura 9: Demultiplexor DWDM.	22
Figura 10: Modelo de un OADM de dos direcciones con adición/sustracción de un canal.	23
Figura 11: Ejemplo de una Matriz de Trafico.	23
Figura 12: Modelo teórico de un ROADM de N lambdas con 8 grados.	24
Figura 13: Diagrama simplificado de un ROADM de 2 grados con 2 canales.	25
Figura 14: Diagrama simplificado de un Transponder Óptico.	26
Figura 15: Ejemplo de una topología de bus.	27
Figura 16: Ejemplo de una topología de anillo con Canal de Supervisión Óptico.	28
Figura 17: Topologías de malla y estrella implementadas sobre un anillo DWDM con OADMs.	28
Figura 18: Alcance de las partes de la trama OTN a lo largo de un enlace DWDM.	30
Figura 19: Estructura de la trama OTN.	30
Figura 20: Encabezado OPUK de la trama OTN.	31
Figura 21: Encabezado ODUK de la trama OTN.	32
Figura 22: Encabezado OTUK de la trama OTN.	33
Figura 23: Multiplexado y mapeo de trama OTN.	34
Figura 24: Encapsulamiento en la trama OTN.	35
Figura 25: Protección de Línea Óptica en estado normal.	36
Figura 26: Protección de Línea Óptica en estado conmutado.	36
Figura 27: Protección ODUK-SNCP en estado normal.	37
Figura 28: Protección ODUK-SNCP en estado conmutado.	38
Figura 29: Estructura de la Red de Transmisión ASON.	40
Figura 30: Relación entre las capas de la red ASON.	42
Figura 31: Estructura del software ASON.	43
Figura 32: Ubicación de los bytes que transportan la información ASON en la trama OTN.	46
Figura 33: Descubrimiento automático de los Enlaces de Control en un dominio ASON.	47
Figura 34: Composición de un TE Link en términos de la trama OTN.	48
Figura 35: Label Switched Path.	49
Figura 36: Restauración de LSP.	50
Figura 37: LSP Revertivo.	51
Figura 38: Servicio Diamond.	52
Figura 39: Servicio Silver.	54
Figura 40: Topología de la Maqueta de Pruebas.	57
Figura 41: Hardware del Elemento de Red Superior.	58
Figura 42: Hardware del Elemento de Red Inferior.	59
Figura 43: Diagrama de Flujo del Elemento de Red Superior.	60
Figura 44: Diagrama de Flujo del Elemento de Red Inferior.	61
Figura 45: Tipos de medios de transmisión utilizados en la maqueta de pruebas.	62
Figura 46: Modulo SFP+.	63
Figura 47: Atenuador Óptico Fijo de 7dB.	63
Figura 48: Detalle de conexión entre el Elemento de Red Inferior y el BERT.	64
Figura 49: Detalle del loop ubicado en Elemento de Red Superior.	64
Figura 50: Estado inicial del escenario Diamond 1.	74

Figura 51: Escenario Diamond 1 con el primer LSP interrumpido.	74
Figura 52: Escenario Diamond 1 con dos LSPs interrumpidos.	75
Figura 53: Escenario Diamond 1 con todos los LSPs interrumpidos.	75
Figura 54: Estado inicial del escenario Diamond 2.	76
Figura 55: Escenario Diamond 2 con el primer LSP interrumpido.	76
Figura 56: Escenario Diamond 2 con dos LSPs interrumpidos.	77
Figura 57: Escenario Diamond 2 con todos los LSPs interrumpidos.	77
Figura 58: Estado inicial del escenario Diamond 3.	78
Figura 59: Escenario Diamond 3 con el primer LSP interrumpido.	78
Figura 60: Escenario Diamond 3 con dos LSPs interrumpidos.	79
Figura 61: Escenario Diamond 3 con todos los LSPs interrumpidos.	79
Figura 62: Estado inicial del escenario Silver 1.	80
Figura 63: Escenario Silver 1 con el primer LSP interrumpido.	80
Figura 64: Escenario Silver 1 con los dos primeros LSPs interrumpidos.	81
Figura 65: Escenario Silver 1 con todos los LSPs interrumpidos.	81
Figura 66: Estado inicial del Escenario Silver 2.	82
Figura 67: Escenario Silver 2 con el primer LSP interrumpido.	82
Figura 68: Escenario Silver 2 con los primeros dos LSPs interrumpidos.	83
Figura 69: Escenario Silver 2 con todos los LSPs interrumpidos.	83
Figura 70: Estado inicial del Escenario Silver 3.	84
Figura 71: Escenario Silver 3 con el primer LSP interrumpido.	85
Figura 72: Escenario Silver 3 con el tercer LSP interrumpido.	85
Figura 73: Escenario Silver 3 con todos los LSPs interrumpidos.	86
Figura 74: Estado inicial del escenario Cooper.	87
Figura 75: Escenario Cooper con el primer LSP interrumpido.	87
Figura 76: Escenario Cooper con dos LSPs interrumpidos.	88
Figura 77: Escenario Cooper con todos los LSPs interrumpidos.	88
Figura 78: Equipo de Medición.	89
Figura 79: Errores generados durante un caso de Restauración Rápida.	91
Figura 80: Errores generados durante un caso de Restauración Lenta.	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Longitud de onda de las principales bandas ópticas del espectro electromagnético.	16
Tabla 2: Velocidad de bit de los cuatro tipos de trama OTN actualmente normalizados.	33
Tabla 3: Especificaciones técnicas de los módulos SFP+ utilizados.	62
Tabla 4: Enlaces de Control de la Maqueta de Pruebas.	66
Tabla 5: Enlaces de Ingeniería de Trafico de la Maqueta de Pruebas.	67
Tabla 6: Escenarios configurados en la Maqueta de Pruebas.	68
Tabla 7: Parámetros de configuración del Escenario Diamond 1.	68
Tabla 8: Parámetros de configuración del Escenario Diamond 2.	69
Tabla 9: Parámetros de configuración del Escenario Diamond 3.	69
Tabla 10: Parámetros de configuración del Escenario Silver 1.	70
Tabla 11: Parámetros de configuración del Escenario Silver 2.	70
Tabla 12: Parámetros de configuración del Escenario Silver 3.	71
Tabla 13: Costo de los TE Links del Escenario Silver 3.	71
Tabla 14: Parámetros de configuración del Escenario Cooper.	72
Tabla 15: Escenarios de prueba.	73
Tabla 16: Costo de los TE Links utilizados en el escenario Silver 3.	84
Tabla 17: Eficiencia de utilización de ancho de banda por tipo de servicio ASON.	94

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Relación entre la longitud de onda y la frecuencia.	13
Ecuación 2: Modelo teórico para calcular el tiempo de conmutación de un servicio 10GE LAN.	90
Ecuación 3: Cálculo del tiempo de conmutación en un escenario de Restauración Rápida.	91
Ecuación 4: Cálculo del tiempo de conmutación en un escenario de Restauración Lenta.	92
Ecuación 5: Tiempo de Restauración Rápida.	93
Ecuación 6: Tiempo de Restauración Lenta.	94

INTRODUCCIÓN

El volumen e importancia de los flujos de información de las redes de transporte actuales demandan cada vez más nuevas tecnologías que aprovechen mejor los medios de transmisión existentes así como nuevas maneras de incrementar la disponibilidad de los servicios que atraviesan dichas redes. La industria Mexicana y mundial utiliza ampliamente la tecnología DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) para satisfacer dicha demanda a través de la fibra óptica, sin embargo, cortes de fibra óptica externa o fallas de hardware limitan la disponibilidad de los enlaces de telecomunicaciones, por lo que paralelamente al desarrollo de nuevas formas de aumentar la tasa de transferencia de bits por longitud de onda, se han desarrollado nuevas esquemas de conmutación de servicios punto a punto que aumentan la disponibilidad de flujos de información específicos. Las redes ASON (Automatic Switching Optical Network) para redes DWDM con OTN (Optical Transport Network) son la vanguardia en esquemas de conmutación de servicios de alta capacidad pues otorgan inteligencia a las redes de transporte, brindando a la capa 1 del modelo OSI, protocolos de enrutamiento que antes solo pertenecían a la capa 3 del mismo.

Pese a que las redes DWDM están en auge y en constante crecimiento tanto en su número de lambdas como en la capacidad de las mismas, actualmente todavía no hay redes ASON para DWDM en la industria Mexicana, sin embargo el interés en las mismas ha ido creciendo de manera lenta pero sostenida en los últimos años, de tal forma que hay pequeños grupos que han realizado y realizan pruebas de homologación de esta tecnología en laboratorios de la industria.

En otros países de América Latina el interés por las redes ASON para DWDM es aún mayor que en México, pues en América Latina ya existen actualmente este tipo de redes en producción, las cuales son redes jóvenes con uno o dos años de vida. Este escenario ha provocado una demanda de conocimiento y entrenamiento en esta nueva tecnología. Ingenieros Mexicanos han participado en la implementación, configuración y entrenamiento de la tecnología ASON para DWDM en América Latina.

En países de Europa y Asia, la tecnología ASON para DWDM es ya una tecnología bien conocida y las redes implementadas en estos continentes presentan un estado maduro, este escenario provoca que sean necesarios Ingenieros que no solo dominen los conocimientos básicos de esta tecnología, sino que también conozcan los métodos de Operación y Mantenimiento específicos de la misma.

OBJETIVOS

Con fines didácticos, se decidió elaborar una maqueta DWDM real en laboratorio para probar y documentar la creación, el funcionamiento y la conmutación correcta de tres tipos diferentes de servicios ASON de capa eléctrica con equipo de medición especializado. Se espera comprobar que es posible implementar mecanismos de protección inteligente y calidad de servicio en una red DWDM a nivel de transmisión.

Los objetivos específicos de esta tesis son los siguientes:

- ❖ Investigación y elaboración de documentación sobre el estado del arte de las tecnologías DWDM y ASON.
- ❖ Construcción y configuración de una maqueta de pruebas DWDM+ASON (de capa eléctrica) con los equipos DWDM y el Sistema de Gestión de Red del Fabricante de Equipo de Transmisión.
- ❖ Realización de los experimentos específicos de acuerdo al protocolo de pruebas propuesto con los equipos DWDM y el Sistema de Gestión de Red del Fabricante de Equipo de Transmisión así como el Equipo de Medición Especializado del Fabricante de Equipo de Medición.
- ❖ Documentación de los resultados obtenidos en las pruebas y elaboración de las conclusiones correspondiente.

CAPÍTULO 1:

REDES DWDM TRADICIONALES

Para poder explotar las capacidades teóricas excepcionales de ancho de banda de las fibras ópticas externas actualmente instaladas en las redes de transporte de larga distancia, es necesario aplicar un esquema de Multicanalización que permita la transmisión simultánea de varias señales portadoras de información que permitan aprovechar al máximo un mismo filamento de fibra óptica sin necesidad de instalar más medios de transmisión durante la expansión de la capacidad de un enlace de fibra óptica.

1.1.: DWDM Tradicional

La tecnología DWDM ha ido evolucionando de tal forma que se puede dividir en tres grandes etapas históricas, la primera etapa es el WDM Primigenio, la segunda etapa es el DWDM+OTN y la tercera etapa es el DWDM+OTN+ASON. Dentro de este capítulo daremos un repaso a los fundamentos y los mecanismos de protección de las redes DWDM tradicionales, que comprenden las dos primeras etapas históricas.

1.1.1.: Principio de funcionamiento de la tecnología DWDM

WDM es una técnica de Multicanalización por División de Longitud de Onda óptica que permite transmitir una gran cantidad de señales de información simultáneamente por el mismo medio de transmisión, que en este caso se trata de la fibra óptica. DWDM funciona en la franja infrarroja del espectro electromagnético.

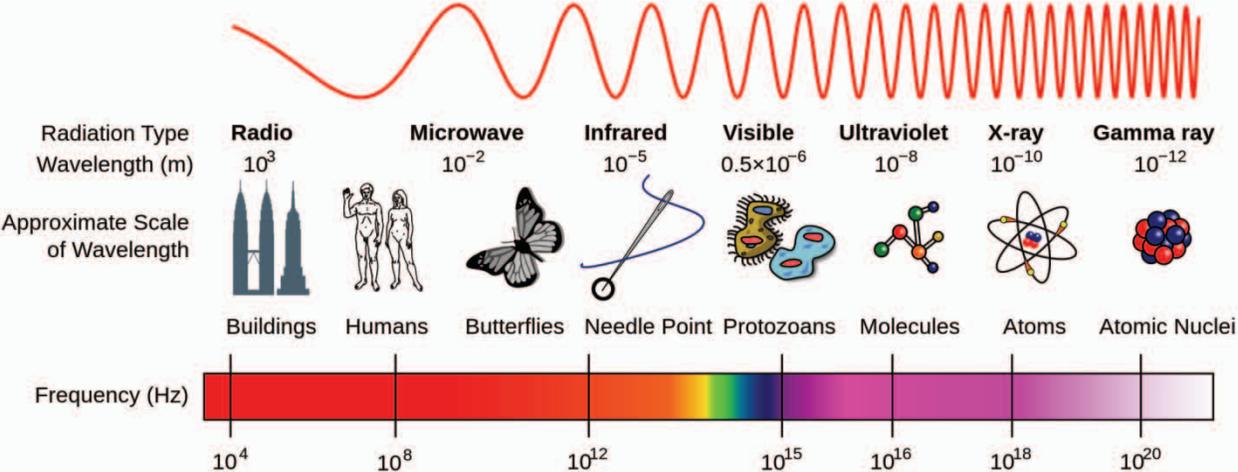


Figura 1: Espectro Electromagnético.

Es importante mencionar que conceptualmente hay un gran parecido entre FDM y WDM dado que hay una relación inversamente proporcional entre la longitud de onda y la frecuencia de una señal electromagnética, como se muestra en la siguiente ecuación

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Ecuación 1: Relación entre la longitud de onda y la frecuencia.

Saltar del dominio radioeléctrico al óptico conlleva una serie de problemas teóricos y técnicos que tuvieron que ser resueltos para poder desarrollar DWDM, de entre ellos la forma de crear diodos laser sintonizables, foto detectores más sensibles, multiplexores ópticos pasivos, multiplexores de adición/sustracción de señales, amplificadores ópticos de bajo ruido, compensadores de dispersión, etc.

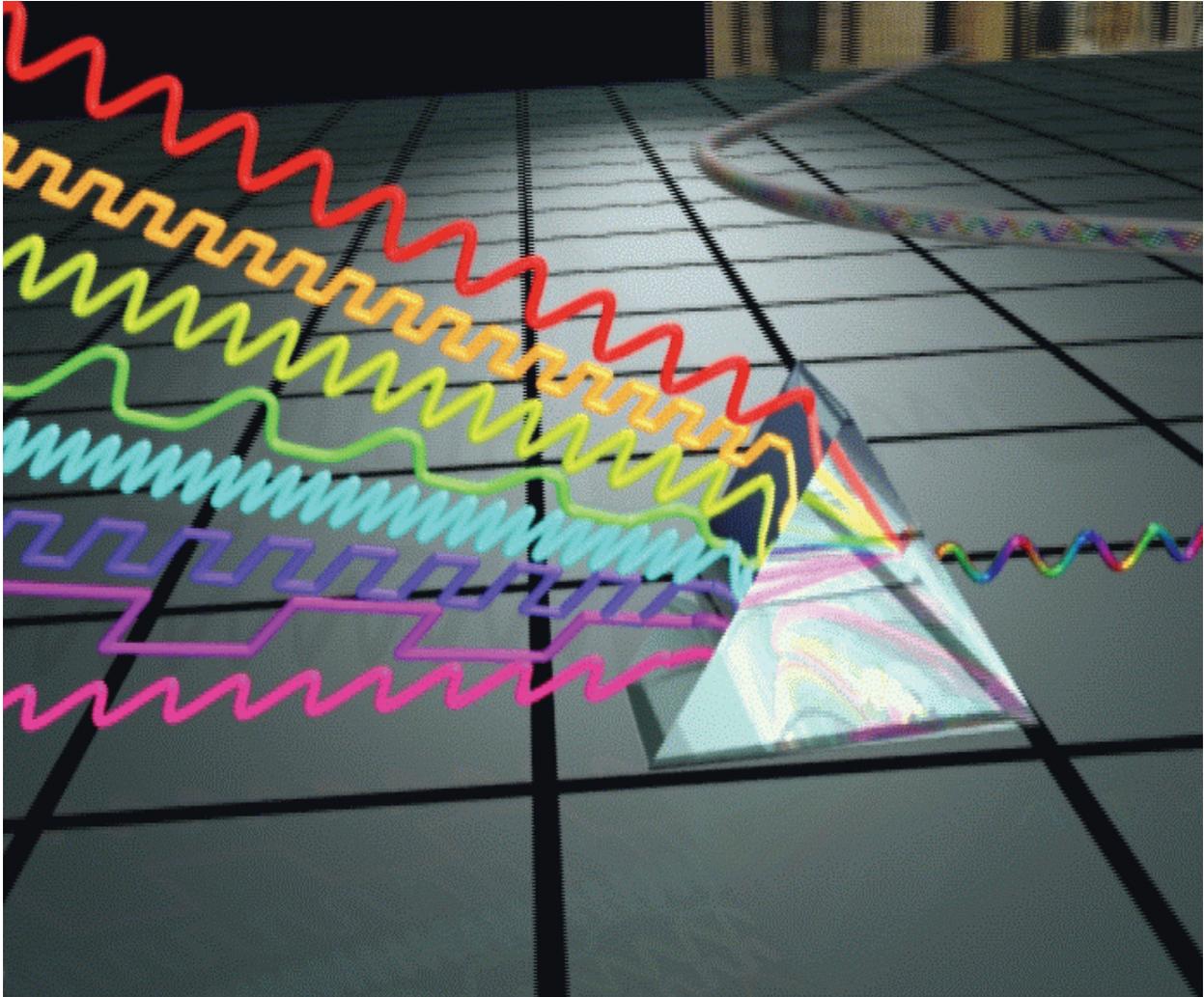


Figura 2: Principio de funcionamiento de la tecnología WDM.

De manera conceptual se puede decir que un canal óptico DWDM es un tubo coloreado de cientos de kilómetros de longitud por donde viaja un flujo de información descolorido o señal cliente que bien puede ser una señal síncrona (como SDH) o asíncrona (como Ethernet). A su vez, varios tubos coloreados o colores corren por la misma fibra óptica sin interferirse mutuamente conformando entre todos ellos una señal compuesta de la mezcla de todos esos colores. De la misma manera en la que un prisma transforma un rayo de luz blanca en un arcoíris y viceversa.

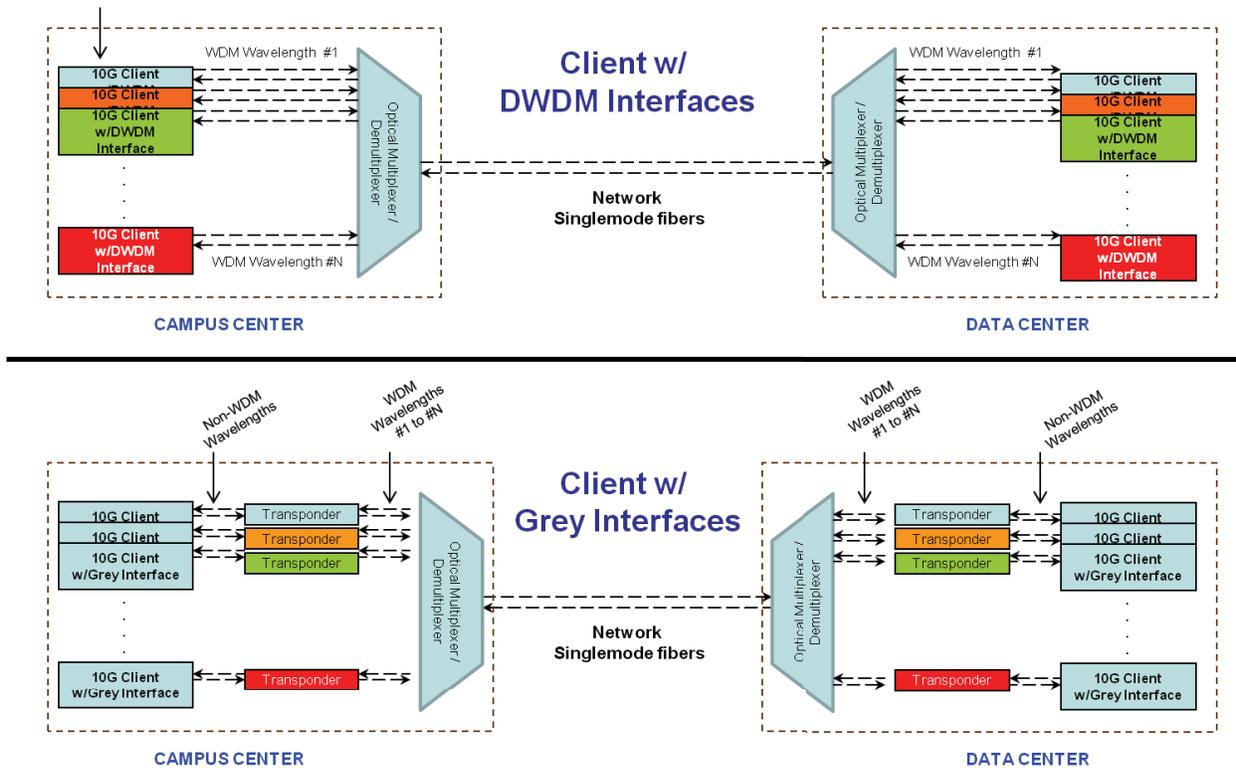


Figura 3: Ejemplos de sistemas de comunicaciones ópticas con WDM.

Como se verá más adelante, los dispositivos que colorean señales cliente y las mezclan se llaman Transponders y Multiplexores respectivamente.

Los actuales sistemas DWDM insertan varias señales cliente en varios canales ópticos con longitudes de onda de específicas. Dichas longitudes de onda están especificadas en las normas de la ITU-T mediante tablas de acuerdo a espaciamentos de frecuencia específicos. Dichos espaciamentos varían entre 100, 50, o 25 GHz siendo estos últimos los que soportan la mayor cantidad de canales ópticos por fibra óptica.

Los canales ópticos de las distintas variantes de la tecnología WDM se distribuyen de acuerdo a Bandas Ópticas definidas también por ITU-T, dichas bandas ópticas son segmentos o ventanas de la franja infrarroja del espectro electromagnético donde se puede transmitir luz tomando en cuenta las características de atenuación y dispersión de la fibra óptica. Las bandas ópticas utilizadas en WDM son O, E, S, C, L y U.

Banda Óptica	Nombre Alternativo	Longitud de Onda (nm)
O-band	Original	1260-1360
E-band	Extended	1360-1460
S-band	Short	1460-1530
C-band	Conventional	1530-1565
L-band	Long	1565-1625
U-band	Ultra-long	1625-1675

Tabla 1: Longitud de onda de las principales bandas ópticas del espectro electromagnético.

DWDM significa Dense Wavelength Division Multiplexing y se traduce como Multicanalización Densa por División de Longitud de Onda. Este sistema utiliza la banda C. Los espaciamentos inter canal actualmente normalizados son de 200, 100, 50 y 25 GHz con una capacidad total de 20, 40, 80 y 160 canales respectivamente. Sin embargo, nuevos inventos como el amplificador Raman permiten el uso de las bandas L y U incrementando todavía más el número de canales máximos utilizables. La capacidad de transporte por fibra óptica puede ser incrementado todavía más utilizando técnicas de modulación de última generación que transmiten a tasas de 40, 100 o 400 Gbps por longitud de onda. En la siguiente imagen se puede apreciar un comparativo de los principales esquemas de separación inter canal de acuerdo a ITU-T¹.

¹ Norma ITU-T G.694.1: Matriz Espectral para aplicaciones DWDM.

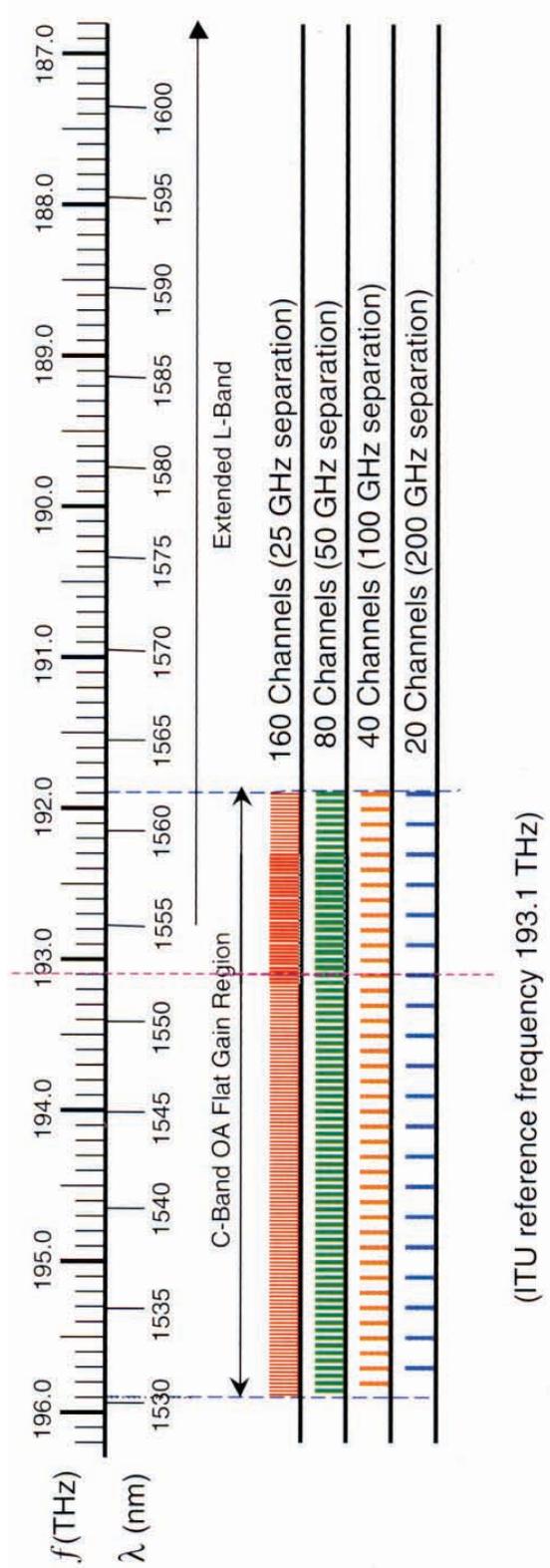


Figura 4: Comparativo de los 4 esquemas de espaciamento intercanal definidos por ITU-T.

1.1.2.: Elementos DWDM

Los elementos con los que se construye una red DWDM real pueden tener diferentes nomenclaturas o presentaciones dependiendo del fabricante de equipo de transmisión, sin embargo el principio básico de funcionamiento de cada uno de ellos es el mismo pues todos los proveedores siguen las mismas normas de ITU-T.

❖ Amplificadores Ópticos

Una señal óptica, como cualquier otra señal, se atenúa o debilita mientras se propaga en un medio de transmisión diferente al vacío. El Amplificador Óptico ha sido diseñado para compensar la atenuación que sufre una señal de luz compuesta en su travesía por una óptica de larga distancia.

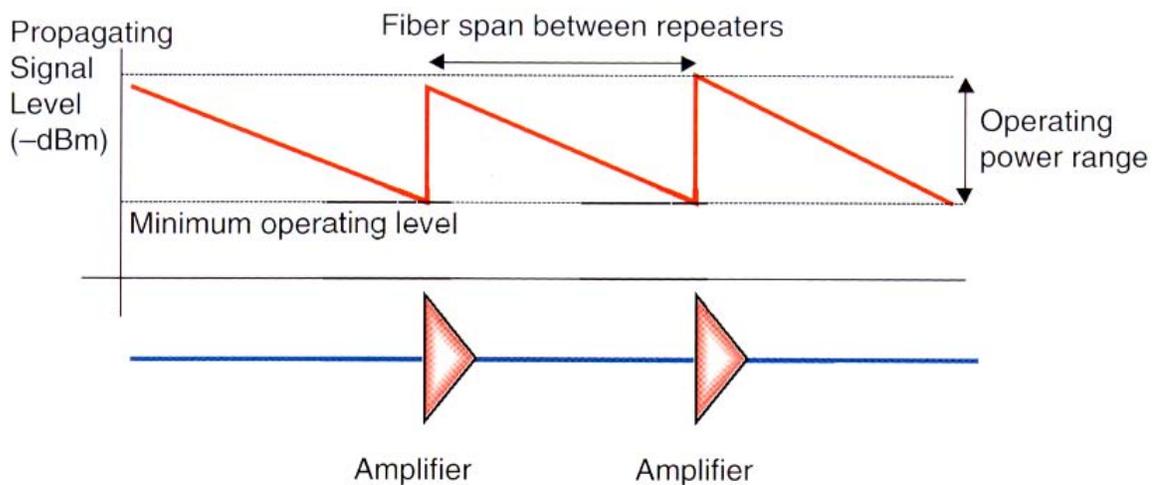


Figura 5: Aplicación de los Amplificadores Ópticos.

Hay muchos tipos de amplificadores ópticos que se diferencian unos de otros tanto por sus regiones espectrales de operación como por sus ganancias. Entre ellos se encuentran los Amplificadores de Fibra Dopada (DFA), los Amplificadores Ópticos de Semiconductor (SOA) y los Amplificadores Ópticos de Raman².

² DWDM: NETWORKS, DEVICES, AND TECHNOLOGY, Stamatios V. Kartalopoulos.

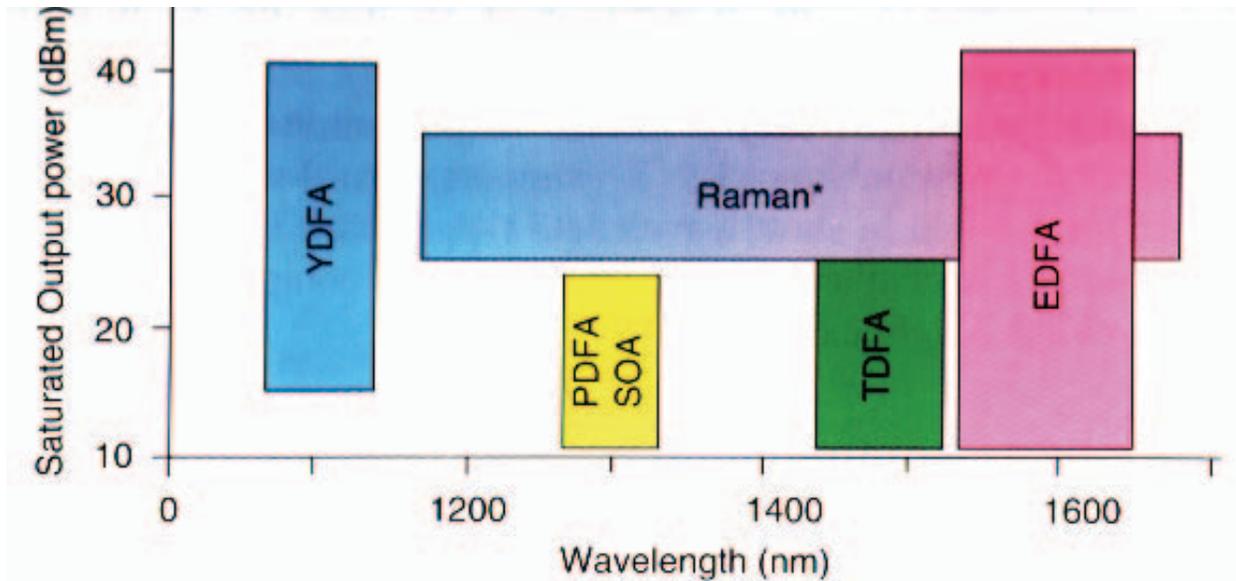


Figura 6: Comparativo de Amplificadores Ópticos de acuerdo con su banda de operación.

En DWDM, los amplificadores más utilizados son los EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) y Raman. La principal diferencia entre ellos es que el amplificador EDFA tiene un medio de ganancia dopado con Erbium interno en contraste con el amplificador Raman que utiliza la misma fibra óptica de larga distancia como medio de ganancia.

❖ Compensador de Dispersión

Un compensador de dispersión es una bobina de fibra óptica con dispersión negativa que tiene la función de contrarrestar la expansión de los pulsos ópticos en el dominio del tiempo. Es decir, contrarrestar la dispersión cromática.

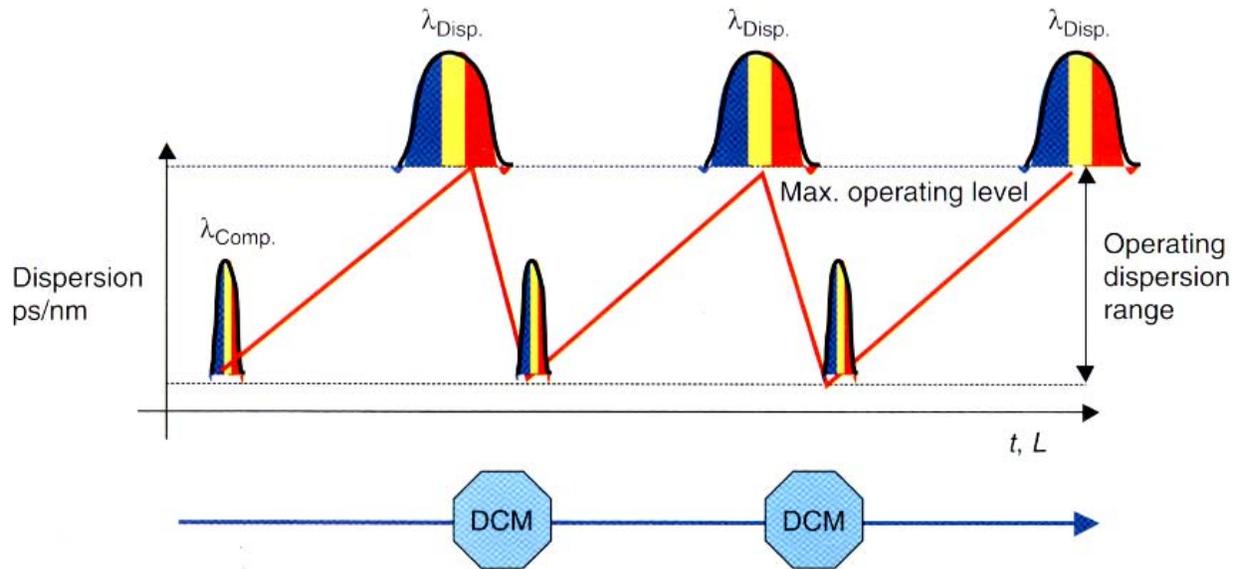


Figura 7: Aplicación de los Compensadores de Dispersión Cromática.

❖ Multiplexor WDM

Los Multiplexores Ópticos combinan varias señales coloreadas (con longitudes de onda diferentes) en una sola señal compuesta de la suma de dichas señales coloreadas.

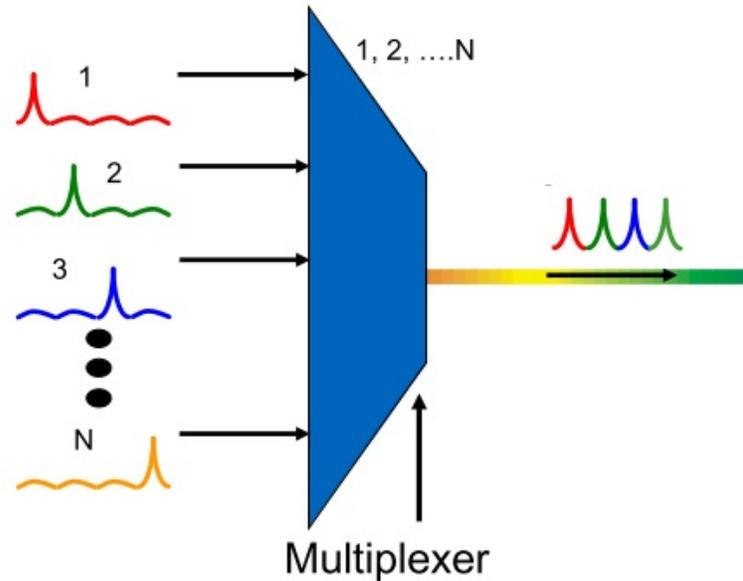


Figura 8: Multiplexor DWDM.

Existen muchas tecnologías de multiplexado/demultiplexado actualmente, pero debido a sus características (y a su precio) pocas de ellas han sido implementadas comercialmente. No obstante por mencionar algunas de las más representativas, tenemos las basadas en rejillas, superprismas o espejos en bucle óptico no-lineal.

❖ Demultiplexor WDM

Un Demultiplexor Óptico recibe una señal óptica compuesta de múltiples señales ópticas coloreadas con diferentes longitudes de onda descomponiéndola en dichas señales constituyentes, de tal modo que cada longitud de onda constituyente aparece en una diferente salida.

Hay dos tipos de demultiplexores ópticos:

- Demultiplexor Pasivo: Está basado en prismas, rejillas de difracción y filtros de frecuencia espectral.
- Demultiplexor Activo: Está basado en una combinación de elementos pasivos y detectores sintonizables, cada uno configurado para detectar una frecuencia específica, sin embargo, éste tipo de demultiplexores pueden no ser apropiados para ciertas aplicaciones (como por ejemplo en OADMs) en las que los detectores no pueden estar presentes.

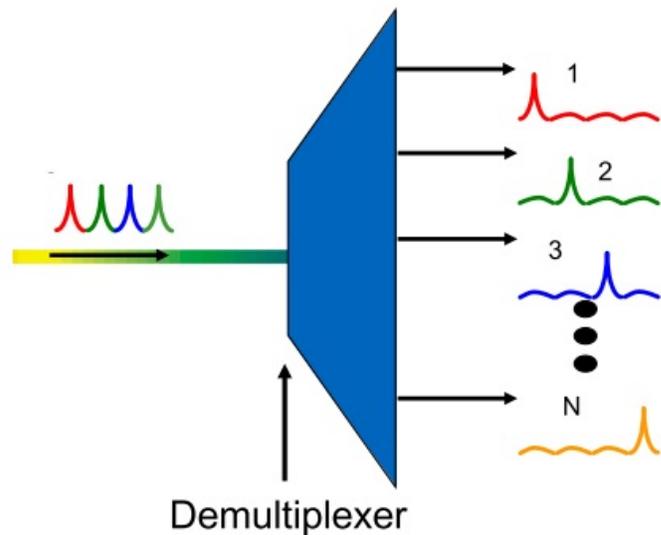


Figura 9: Demultiplexor DWDM.

❖ OADM

El OADM (Optical Add Drop Multiplexer) es un dispositivo que permite agregar, sustraer o dejar pasar canales con longitud de onda especifica en una red DWDM de tal manera que podamos modificar la trayectoria de una o varias longitudes de onda en su viaje por una red DWDM pero con pérdidas de inserción menores a las de una arquitectura basada en Multiplexor + Demultiplexor. Cualquier cambio de trayectoria de un canal óptico en un OADM, tiene que realizarse in sitio mediante la modificación manual del hardware.

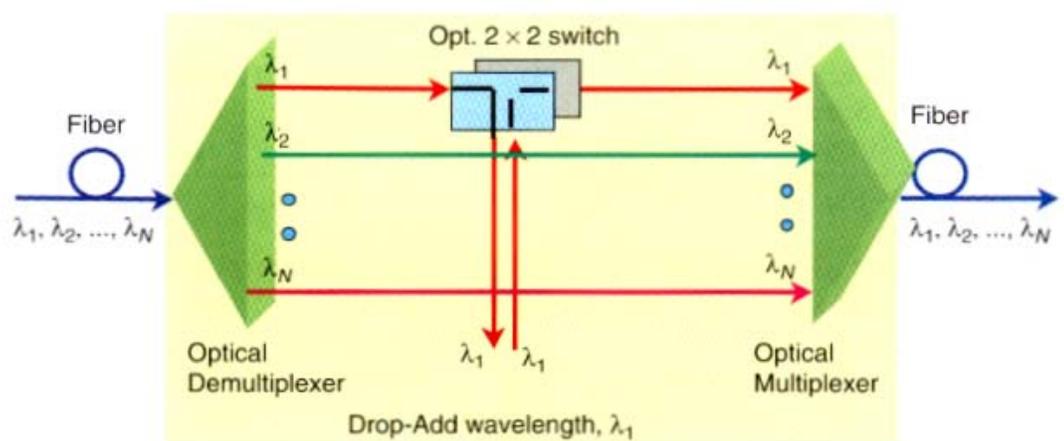


Figura 10: Modelo de un OADM de dos direcciones con adición/sustracción de un canal.

Los puertos de adición y sustracción representan los puntos de entrada y salida donde se conectan los Transponders en una red DWDM. El número de direcciones de un OADM también es conocido como numero de grados del mismo se determina desde el diseño de una red DWDM de acuerdo a una matriz de tráfico. A continuación se ilustra la Matriz de Trafico de una red DWDM de tres ciudades con tres longitudes de onda y OADM intermedio.

	CIUDAD 1		CIUDAD 2		CIUDAD 3	
	W	E	W	E	W	E
192.10 THz		●	●	●	●	
192.20 THz		●	●	●	●	
192.30 THz		●	●	●	●	

Figura 11: Ejemplo de una Matriz de Trafico.

❖ ROADM

El ROADM es un dispositivo opto-electrónico que provee una conmutación a nivel 100% óptico de las longitudes de onda que se propagan de una fibra óptica a otra en una red WDM.

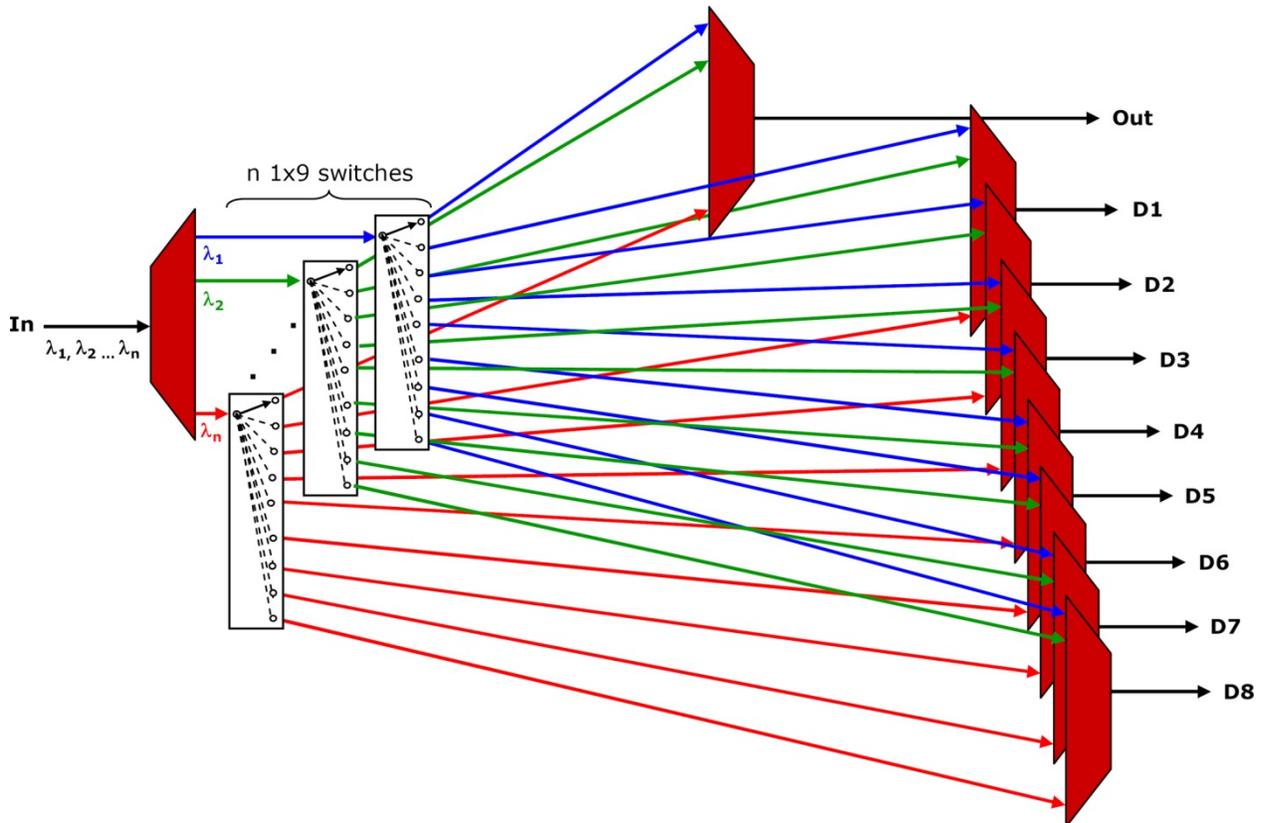


Figura 12: Modelo teórico de un ROADM de N lambdas con 8 grados.

La figura anterior muestra la estructura teórica de un ROADM de 8 direcciones o grados, cada uno con un conjunto de N longitudes de onda que se demultiplexan y multiplexan en las entradas y salidas del ROADM respectivamente. Dependiendo de la configuración de conmutación, una señal que proviene de alguno de los grados puede ser re-direccionada a cualquiera de los otros grados, o bien, ser entregada directamente en el sitio donde está el ROADM.

Cuando es necesario cambiar la longitud de onda de una señal que ingresa al ROADM, es necesario que el ROADM realice la función de intercambio o mapeo de lambdas. Dicha función es costosa y conlleva grandes problemas de degradación de la señal puesto que muchas veces incluye módulos de conversión O-E-O que además de lo anterior añaden retrasos de tiempo que son inadmisibles para aplicaciones con requerimientos de bajísimos valores de latencia.

Asimismo los ROADM se pueden clasificar en las categorías blocking o non-blocking. La categoría non-blocking puede conmutar un número de canales conectados. En contraste, los ROADM blocking no están diseñados para conectar cualquier entrada con cualquier salida al mismo tiempo pues están basados en modelos estáticos que predicen que no todos los canales conectados requerirán conmutarse al mismo tiempo, o bien, que solo una fracción del total conectado podrá ser conmutado (a esto se le llama sobresuscripción).

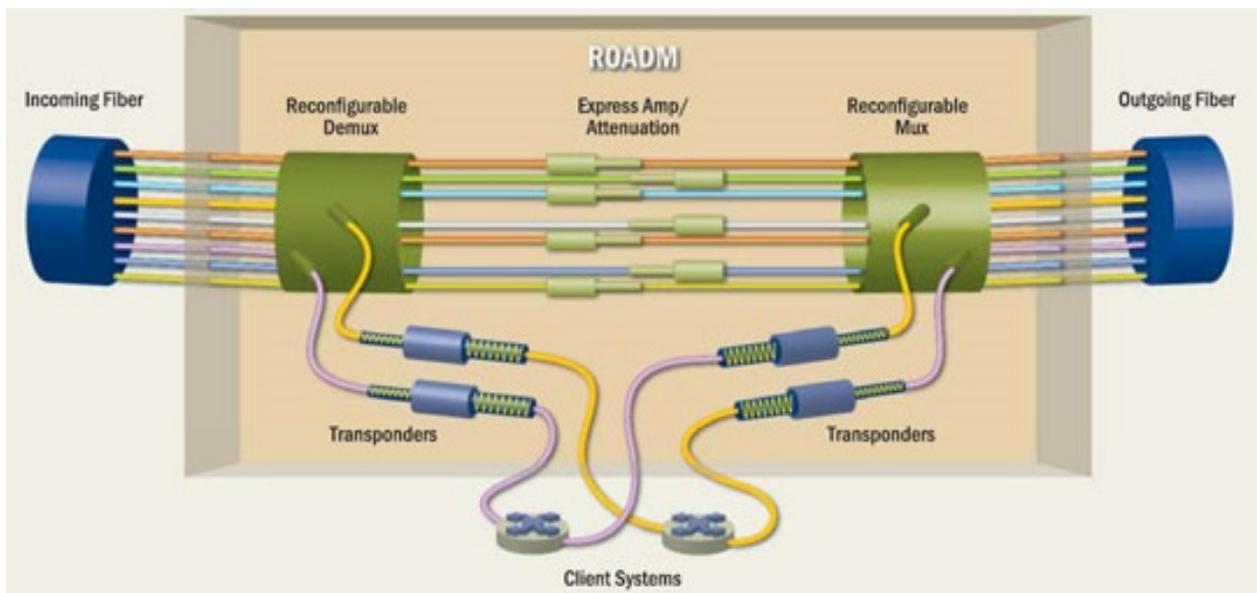


Figura 13: Diagrama simplificado de un ROADM de 2 grados con 2 canales.

Finalmente los ROADM tienen las mismas ventajas de los OADM pero con la característica adicional que para realizar un cambio en la trayectoria de una longitud de onda, no es necesario acudir a sitio puesto que este tipo de cambios se pueden realizar remotamente por software.

❖ Transponder

Un transponder es un dispositivo opto-electrónico que cambia la longitud de onda de la señal cliente, o bien, a una longitud de onda específica a la misma. Existen Transponders fijos o sintonizables.

Un transponder óptico combina una señal cliente con una señal portadora de frecuencia nominal definida por ITU-T de tal forma que se genere una señal de salida en la cual la modulación de amplitud de la señal cliente es adoptada por la portadora mediante un sistema de guías de onda que permiten que la señal resultante porte la misma secuencia de bits que la señal original del cliente. A este proceso se le denomina modulación. Existen Transponders de 2.5, 10, 40, 100 y 400 Gbps.

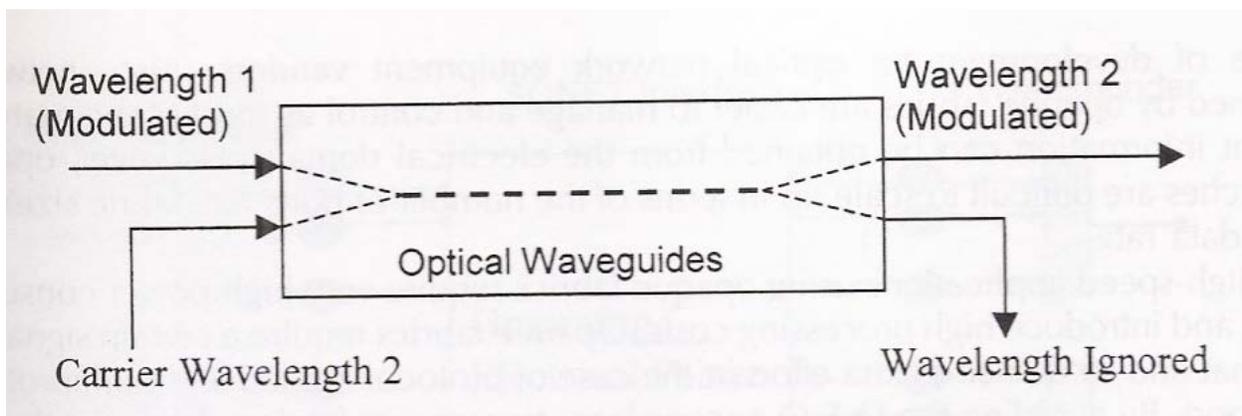


Figura 14: Diagrama simplificado de un Transponder Óptico.

En el diseño de las redes ópticas se desea procesar señales ópticas puramente en el dominio óptico, excepto en las funciones de control de las mismas, lo cual tiene que ser implementado en el dominio eléctrico, mas sin embargo y pese a que se está trabajando en transponders meramente ópticos, en el mercado todavía se usan los transponders híbridos.

1.1.3.: Redes DWDM

Las topologías disponibles para redes DWDM son bus, anillo, anillos tangenciales y mallas. El desempeño de cada topología de red depende de una gran cantidad de factores como lo son el número de nodos, la versatilidad, la máxima capacidad de tráfico, el mecanismo de protección, el número de fibras ópticas entre los nodos, la dificultad o facilidad de mantenimiento, la eficiencia en utilización del ancho de banda, su capacidad de re-configuración, su precio, su preferencia en el mercado, etc.

La topología de red más usada en la actualidad para redes ópticas es la de anillo debido a su afinidad con las gran variedad de esquemas de protección de ruta definidas bajo la tecnología SDH. Le siguen los buses, que son muy utilizados en enlaces dorsales internacionales. Las topologías de malla también son utilizadas pero su costo es mayor, por lo que no son tan comunes como los anillos o los buses, sin embargo las mallas son las topologías más robustas en DWDM.

Los modernos sistemas DWDM están diseñados para transportar una mezcla de varios tipos de tráfico o protocolos de manera transparente (SDH, 1G/10G/40G/100G Ethernet, Fibre Channel, ATM, MPLS, Infiniband, etc.) por lo tanto, las redes DWDM son un ejemplo de la convergencia digital a nivel de transmisión. En aplicaciones DWDM, un nodo óptico o Elemento de Red provee conectividad IP, desempeña conversiones de señales cliente a OCh (Optical Channel), multiplexado/demultiplexado, cross-conexiones ópticas y esquemas de protección.

❖ Topología de bus

En este tipo de topologías es comúnmente implementada par aplicaciones de interconexión entre redes de gran tamaño, es decir, son los enlaces dorsales de los grandes sistemas autónomos. En adición, señales de supervisión que transportan información de desempeño, control, aprovisionamiento y administración para cada canal pueden estar en banda o fuera de banda.

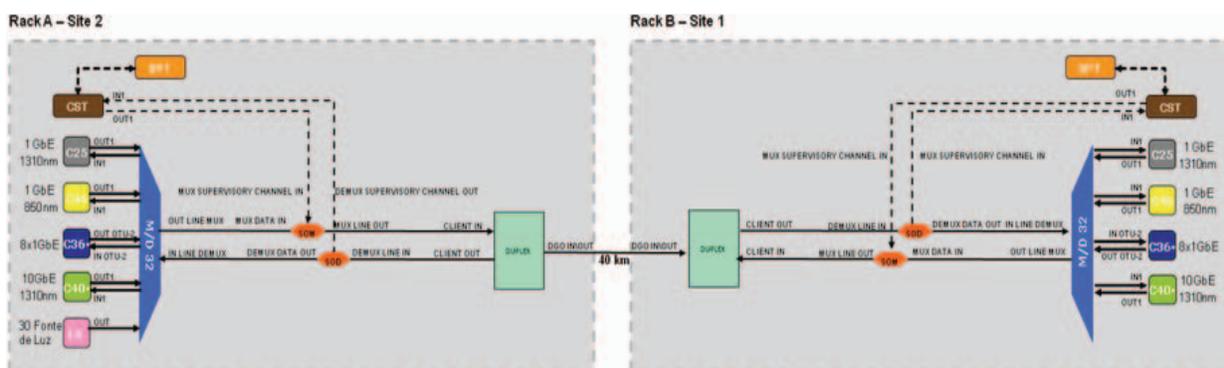


Figura 15: Ejemplo de una topología de bus.

❖ Topología de anillo

La topología de anillo viene en muchas presentaciones, dependiendo de sus dimensiones, el número de nodos que soporta y el tipo de servicios que proporciona. Podemos encontrar tanto anillos metropolitanos (con circunferencia igual a pocos kilómetros) como anillos nacionales, en donde cada nodo es una ciudad grande. La topología de anillo permite proteger servicios, puesto que existen dos formas de conectar dos nodos de dicho anillo.

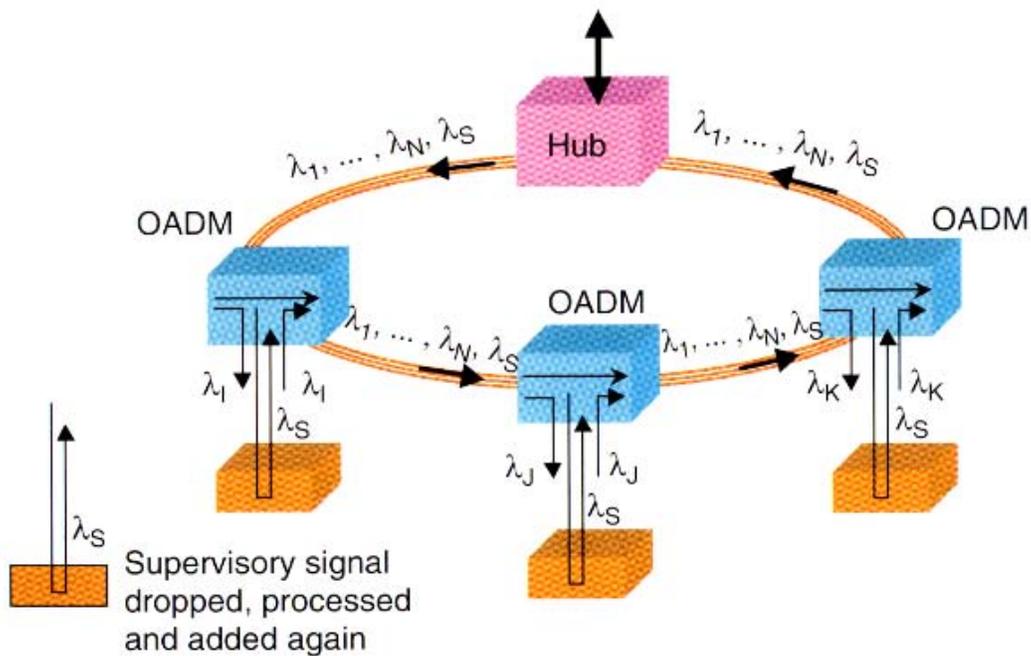


Figura 16: Ejemplo de una topología de anillo con Canal de Supervisión Óptico.

Asimismo, es posible implementar topologías de red de tipo malla o estrella (a nivel lógico) en anillos DWDM (a nivel físico).

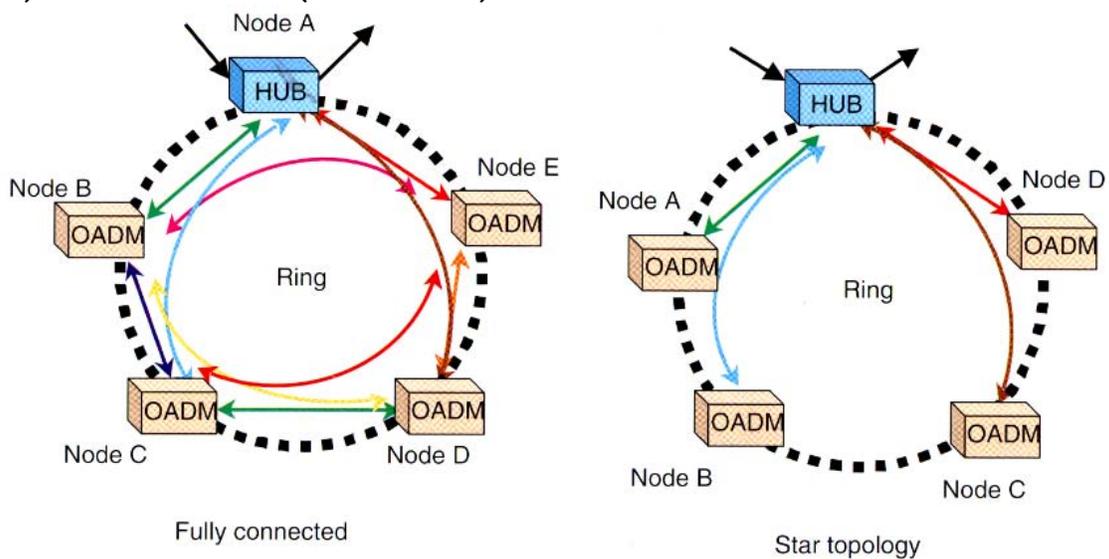


Figura 17: Topologías de malla y estrella implementadas sobre un anillo DWDM con OADMs.

1.1.4.: Norma OTN

La Red de Transporte Óptico (Optical Transport Network) es un conjunto de normas que fueron desarrolladas para mejorar el aprovisionamiento, la operación y el mantenimiento de las redes DWDM primigenias. OTN está definido bajo las normas ITU-T G.872, G.798 y G.709. OTN mejora los mecanismos de administración, mapeo, multiplexado, cross-conexión, protección y corrección de errores de las redes DWDM primigenias, convirtiéndose en un pilar de la industria de las comunicaciones ópticas brindando flexibilidad, rentabilidad a las redes DWDM actuales.

❖ Ventajas Técnicas de OTN

- OTN utiliza el encabezado OPUk para realizar una adaptación y transmisión transparente de una gran variedad de protocolos cliente sin cambiar su respectivo encabezado o carga útil.
- OTN adopta la estructura asíncrona para su multiplexado y concatenación de tal forma que no necesita una fuente externa de sincronización lo cual simplifica el diseño de la red.
- Servicios de velocidad baja como ODU0 pueden ser flexiblemente distribuidos junto con servicios de mayor velocidad en el mismo Canal Óptico (OCh). Esto mejora la eficiencia de utilización de ancho de banda de las redes DWDM primigenias.
- El código de corrección de errores FEC para OTN ha sido añadido para detectar y corregir errores de bit en tiempo real.
- A través del byte TCM, es posible gestionar un Elemento de Red OTN remoto a través de la red OTN de otro carrier, sin que se mezclen las redes de gestión.

❖ Aplicaciones y Características de OTN

- Mapeo de servicios cliente: De acuerdo a la recomendación G.709, esta característica permite adaptar servicios como SDH, Fibre Channel o Ethernet dentro del encabezado OPU de la trama OTN. Cuando la velocidad del servicio es menor que la velocidad del ODU1, el ODU1 es dividido a su vez en ranuras de tiempo para llevar servicios de baja capacidad, por ejemplo, un STM-1, 4xSTM-4, 7xFC100. La división por ranuras de tiempo mejora la utilización de ancho de banda de las redes OTN.

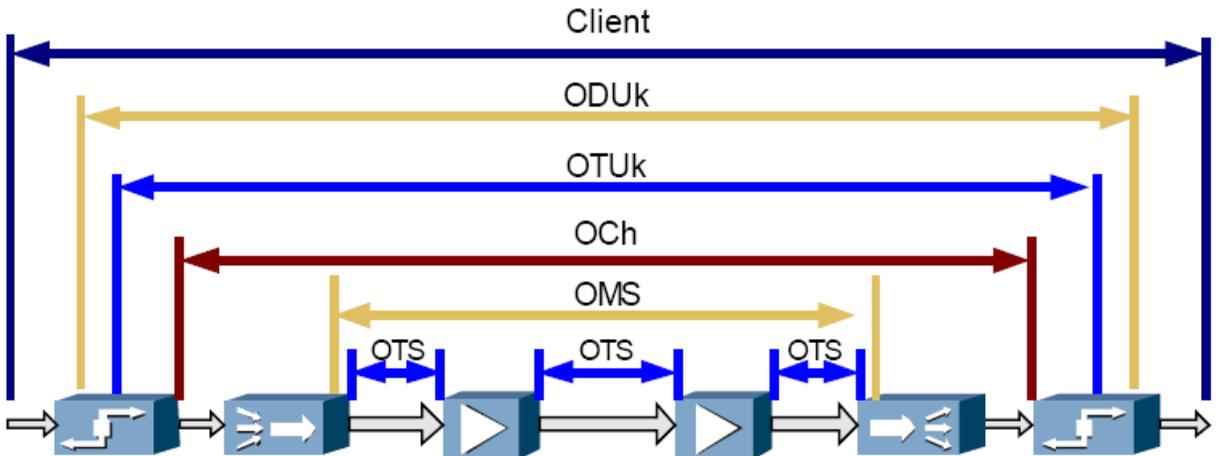


Figura 18: Alcance de las partes de la trama OTN a lo largo de un enlace DWDM.

- **Cross-conexión de canal y Multicanalización:** Esta característica permite combinar 4xODU1 dentro de un ODU2. Esta aplicación también soporta la cross-conexión a nivel óptico (OCh).
- **Protección de Red:** La norma comprende protección a nivel capa OMS, OCh y ODU. Dentro de estas protecciones se encuentran los esquemas OLP y ODUK-SNCP.
- **Gestión:** La norma G.709 especifica el uso de los bytes GCC0, GCC1 o GCC2 para propósito de administración remota:
- **OYM:** La norma G.709 especifica el uso de los bytes SM, PM y TCM para el monitoreo remoto del desempeño de los enlaces a distintos niveles de la trama OTN.

❖ Trama OTN

La Trama OTN se compone del Payload, el encabezado OPUk, el encabezado ODUk, el encabezado OTUk, los bytes de alineación de trama y los bytes de redundancia FEC. La estructura de la trama OTN se muestra a continuación:

	1	7 8	14 15 16 17	3824 3825 4080
1	FA OH	OTUk OH		
2			OPUk OH	
3	ODUk OH			OTUk FEC
4				

Figura 19: Estructura de la trama OTN.

- Encabezado OPUk

El encabezado OPUk agrupa los bytes relevantes que regulan la concatenación y el mapeo de la señal cliente dentro de la sub-trama OPUk organizados en un PSI (Payload Structure Identifier). El PSI contiene los bytes PT que representan el tipo de señal cliente. La estructura de la sub-trama OPUk se ilustra a continuación:

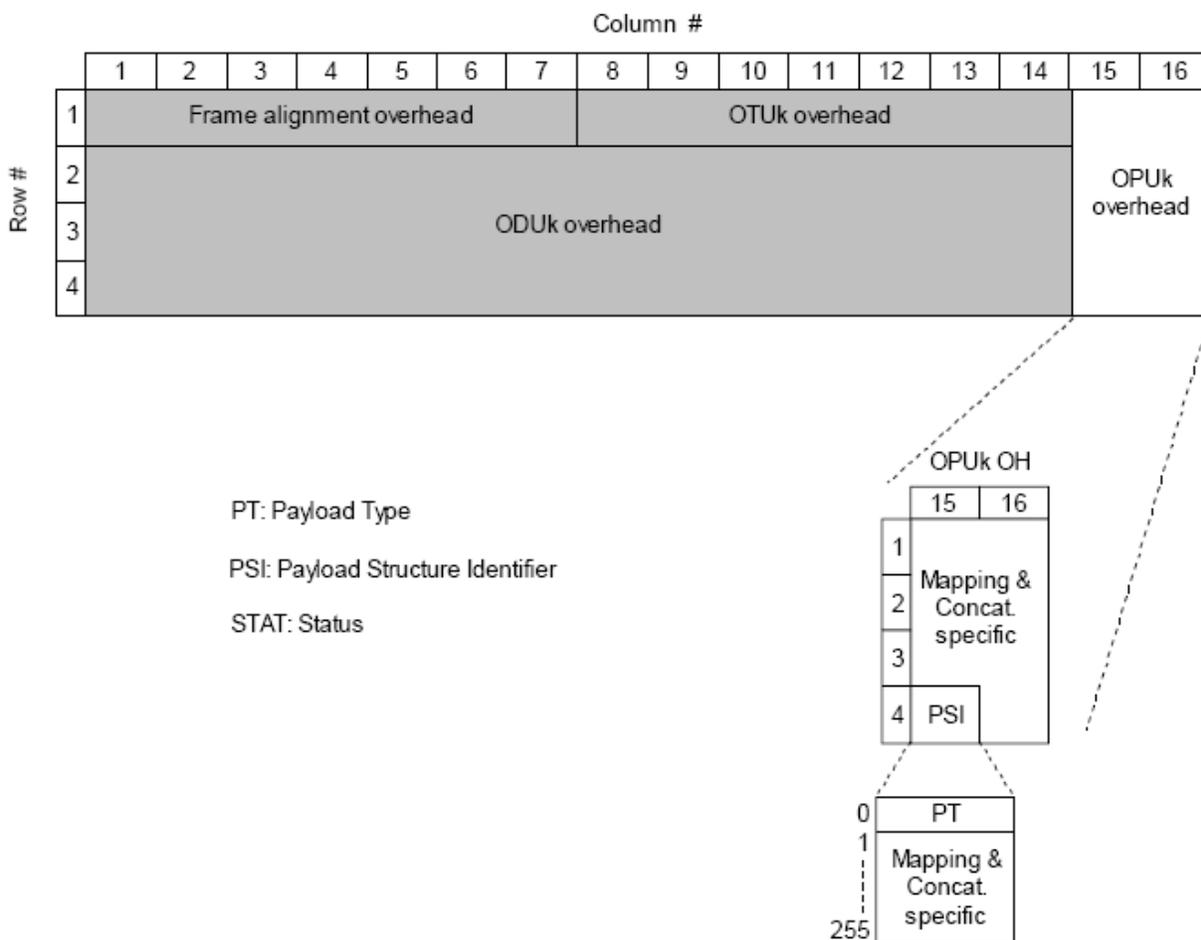


Figura 20: Encabezado OPUk de la trama OTN.

- Encabezado ODUk

El encabezado ODUk agrupa la información relevante al mantenimiento de las señales operativas dentro de sus respectivas rutas ópticas soportando además del monitoreo del estado de conexión de los circuitos de larga distancia por donde viaja la información del cliente. El encabezado ODUk tiene funciones de monitoreo de performance parecidas al encabezado OTUk, pero con un enfoque más lógico. La estructura del encabezado ODUk se ilustra a continuación:

		Column #															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Row#	1	Frame Alignment overhead							OTUk overhead							OPUk overhead	
	2	RES			TCM ACT	TCM6			TCM5			TCM4		FTFL			
	3	TCM3			TCM2			TCM1			PM		EXP				
	4	GCC1		GCC2		APS/PCC			RES								

- ACT: Activation (in the TCM ACT byte)
- APS: Automatic Protection Switching coordination channel
- BDI: Backward Defect Indication
- BEI: Backward Error Indication
- BIAE: Backward Incoming Alignment Error
- BIP8: Bit Interleaved Parity-level 8
- DAPI: Destination Access Point Identifier
- EXP: Experimental
- FTFL: Fault Type & Fault Location reporting channel
- GCC: General Communication Channel
- PCC: Protection Communication Control channel
- PM: Path Monitoring
- RES: Reserved for future international standardisation
- SAPI: Source Access Point Identifier
- STAT: Status
- TCM: Tandem Connection Monitoring
- TTI: Trail Trace Identifier

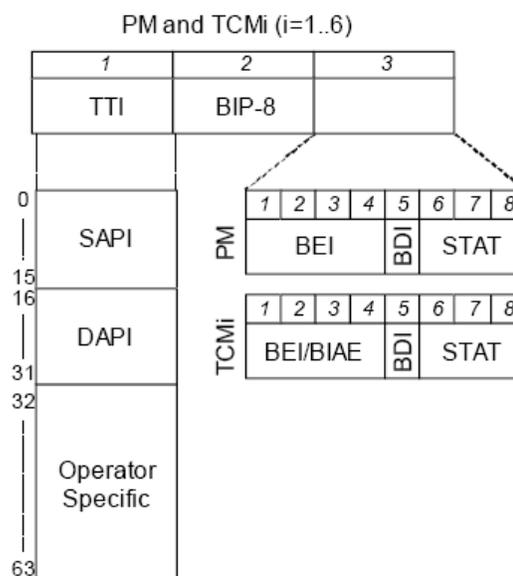


Figura 21: Encabezado ODUk de la trama OTN.

- Encabezado OTUK

El encabezado OTUK se encarga de construir las tramas, multitramas y a realizar el monitoreo de sección SM (Section Monitoring) a nivel físico. Dicho encabezado se divide en tres partes: Encabezado SM, Bytes GCC0 y encabezado RES. La estructura del encabezado OTUK se ilustra a continuación:

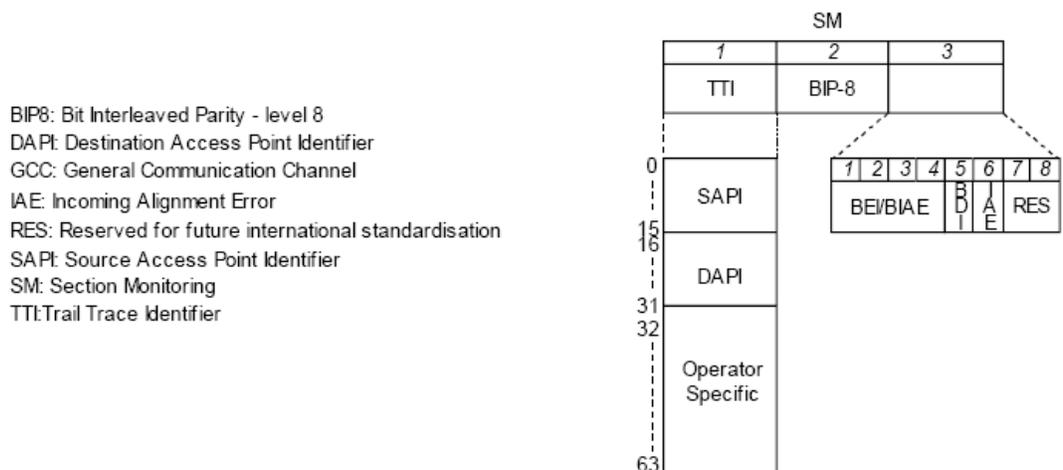
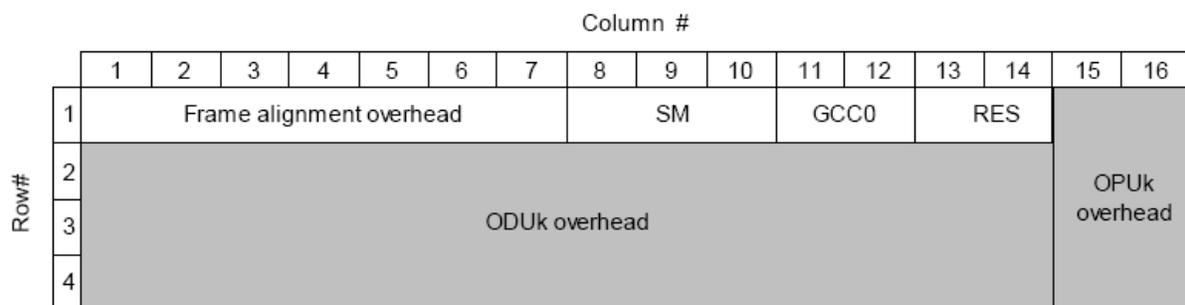


Figura 22: Encabezado OTUK de la trama OTN.

❖ Multiplexado, concatenación y velocidades de OTN

Las velocidades de transferencia de la trama OTN se dividen en 4 tipos de tramas OTU con sus respectivas velocidades de transmisión como se muestra a continuación:

OTUK	Nominal Bit Rate
OTU1	2.488 Gbps
OTU2	9.953 Gbps
OTU3	39.81 Gbps
OTU4	99.53 Gbps

Tabla 2: Velocidad de bit de los cuatro tipos de trama OTN actualmente normalizados.

La siguiente figura ilustra la estructura de concatenación de los elementos de la trama OTN así como su relación de multiplexado para las tramas OTU1/2/3/4.

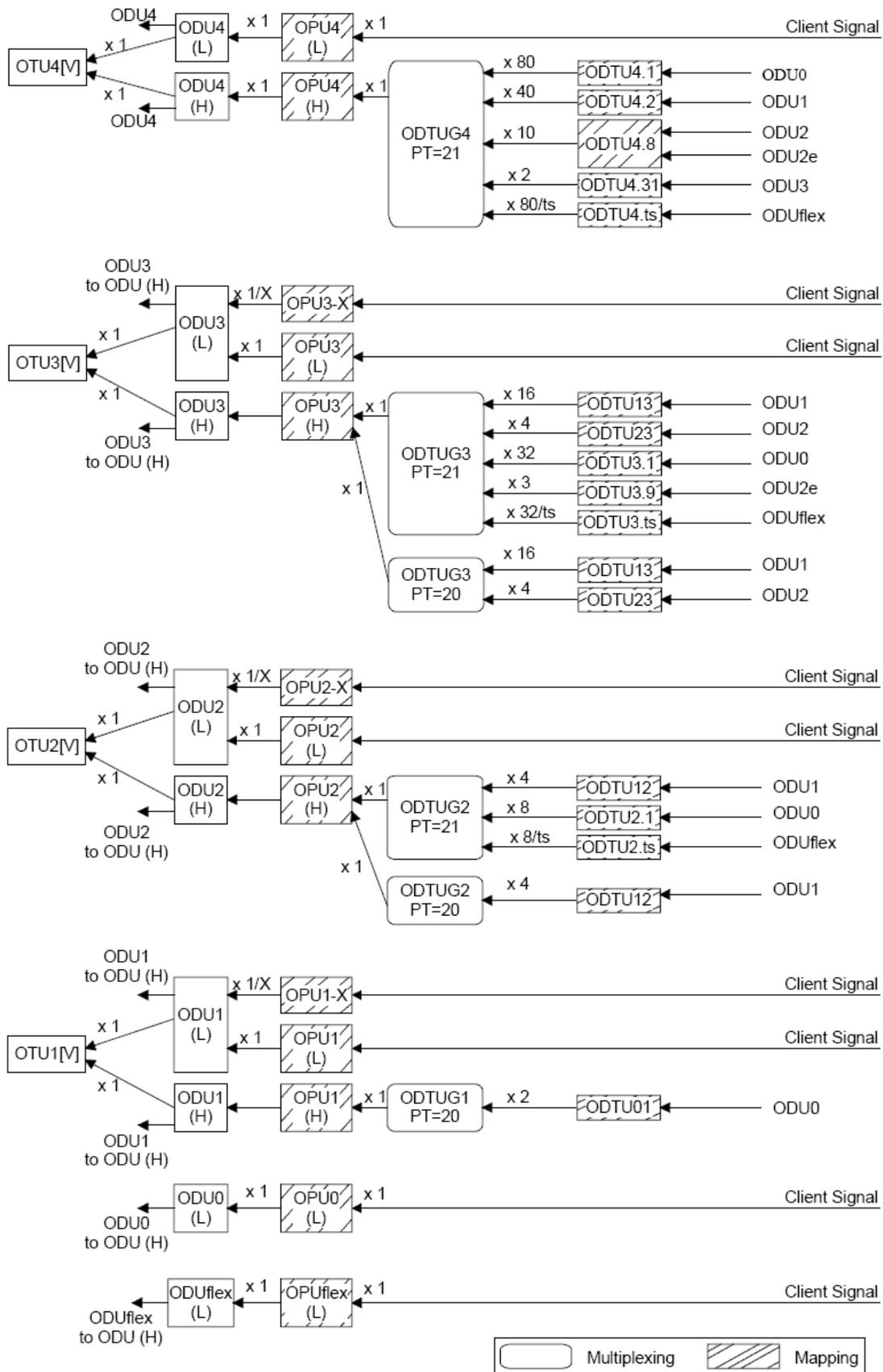


Figura 23: Multiplexado y mapeo de trama OTN.

A continuación se muestra un diagrama de cómo el payload o carga útil del lado cliente de un transponder o tarjeta tributaria se va encapsulando de acuerdo al protocolo OTN³.

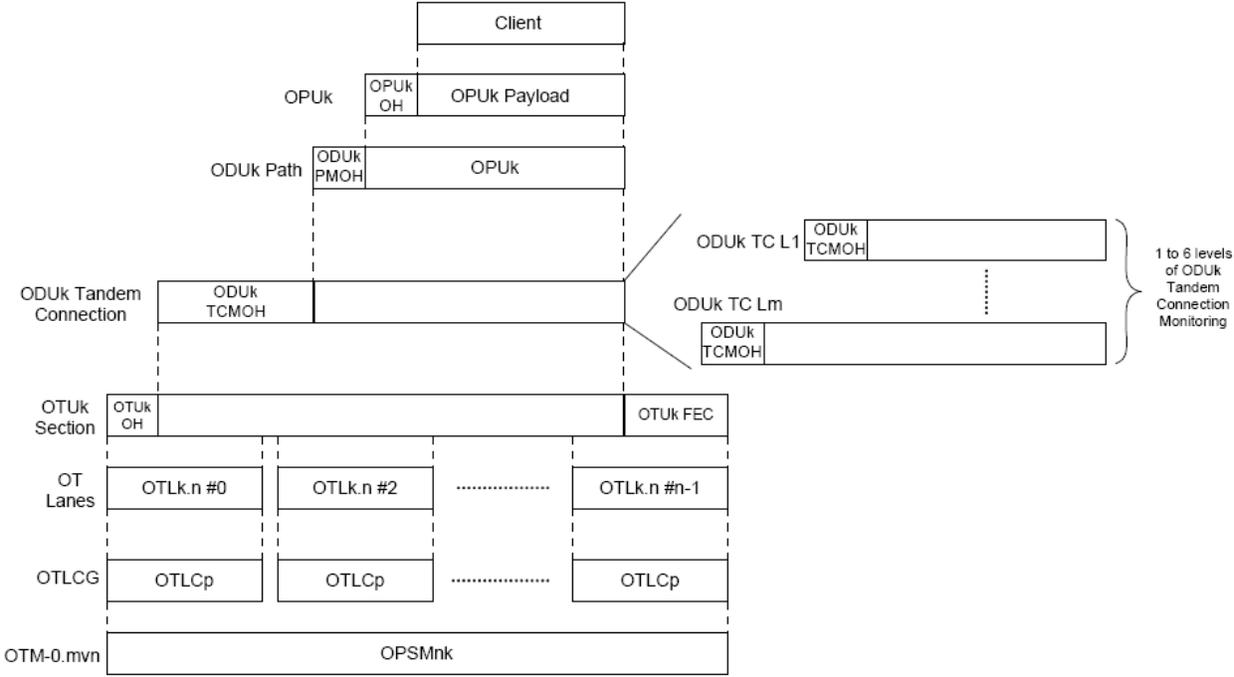


Figura 24: Encapsulamiento en la trama OTN.

³ Norma ITU-T G.709: Interfaces for the Optical Transport Network (OTN).

1.2.: Protecciones Tradicionales DWDM

No es lo mismo una lambda que transporta información de internet a otra que transporta información entre dos aeropuertos, o entre dos hospitales, o entre varios bancos. No todos los servicios tienen la misma prioridad, existen aplicaciones que tienen más relevancia que otras y que deben de estar preparadas para el desastre, que deben estar protegidas contra posibles fallas, aunque requieran más recursos, más hardware. El principio básico de funcionamiento de todas las protecciones, es que existan al menos dos rutas ópticas disponibles por las que pueda circular un servicio, en caso de que una de ellas falle, el sistema debe de conmutar el servicio a la ruta de respaldo.

1.2.1.: Protección de Línea Óptica

La Protección de Línea Óptica es la más simple y al mismo tiempo la más rápida dentro de las protecciones tradicionales 1+1 para DWDM, es ampliamente utilizada en el mercado Mexicano. Su principio de funcionamiento consiste en que la señal óptica que hay que proteger se divide en dos mediante un divisor óptico, cada una de esas partes es enviada por una ruta diferente para finalmente llegar al mismo destino, en donde la señal con mayor potencia óptica es seleccionada y enviada entonces al receptor destino.

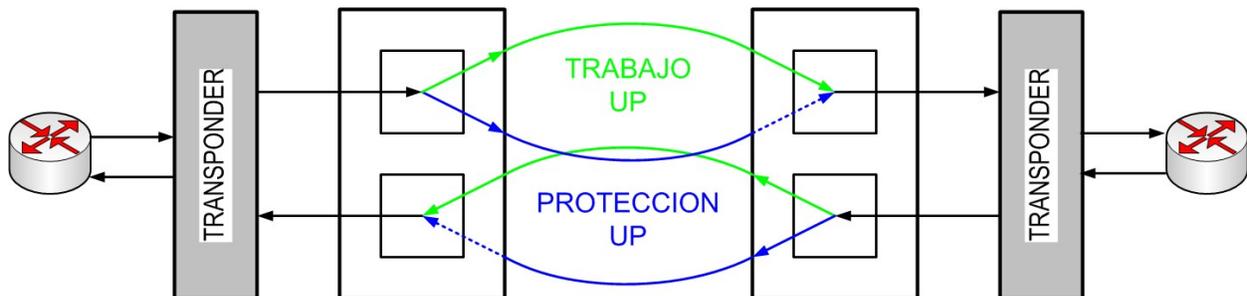


Figura 25: Protección de Línea Óptica en estado normal.

De ocurrir una falla en la ruta activa o de trabajo, la tarjeta de protección remota detecta una diferencia de potencia óptica tras lo cual conmuta a la señal de respaldo o protección.



Figura 26: Protección de Línea Óptica en estado conmutado.

Si ambas rutas están interrumpidas, el servicio se interrumpirá hasta que alguna ruta reestablezca.

Una limitante de esta protección es que solamente trabaja en el dominio óptico, es decir, funciona únicamente para fallas físicas, no lógicas. Sin embargo una ventaja es que puede proteger tanto una lambda como varias lambdas, funciona tanto a nivel OCh como a nivel OMS de la trama OTN. Asimismo, al estar implementada casi totalmente en hardware, su tiempo de conmutación es menor que el de otras protecciones implementadas también en software.

1.2.2.: ODUK-SNCP

La protección ODUK-SNCP, es una adaptación para OTN de la protección SNCP creada originalmente para SDH. SNCP significa Protección de Conexión por Subred (Sub Network Connection Protection) y es un mecanismo de protección 1+1 que puede ser implementado en topologías de anillo, bus o malla. También es ampliamente implementada en México.

El principio de funcionamiento de ODUK-SNCP consiste en que una señal ODUK proveniente de una tarjeta Tributaria es transmitida eléctricamente hacia dos direcciones o subredes independientes entre sí para que el Tributario remoto seleccione la mejor de dichas dos señales mediante la interpretación de los bytes PM de la trama OTN de las tarjetas de línea cross-conectadas. Una protección ODUK-SNCP también puede conmutar mediante comandos introducidos a través de los bytes APS de la trama OTN. Es decir este tipo de protección puede conmutar tanto por factores físicos como por factores lógicos.

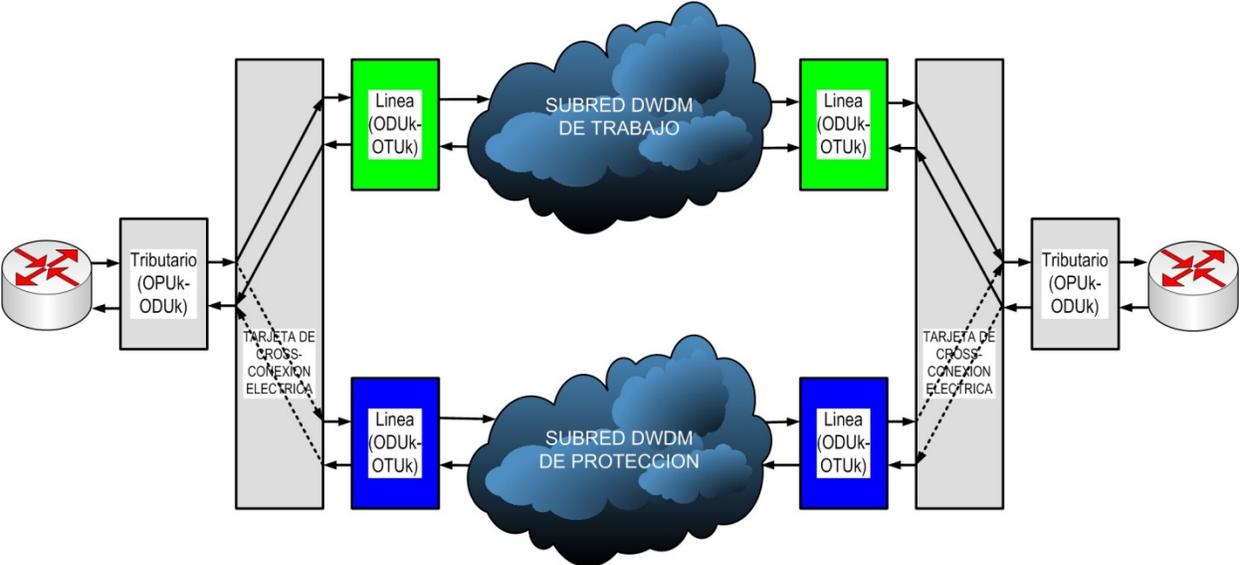


Figura 27: Protección ODUK-SNCP en estado normal.

En el estado inicial o en espera de una protección ODUK-SNCP, no existen eventos de afectación total (SF), ni eventos de afectación parcial (SD), ni comandos APS, por lo tanto el servicio se encuentra circulando por la ruta de Trabajo, que puede o no ser la misma red DWDM donde se encuentran conectados los equipos cliente.

Cuando los bytes PM del encabezado ODUK de la trama OTN de la tarjeta de línea destino de la ruta de trabajo detectan errores de bit, declaran la ruta en estado SD (Signal Degradation) y pueden conmutar o no la señal cliente a la ruta de Protección (dependiendo si la bandera SD esta activada). Cuando los bytes PM del encabezado ODUK de la trama OTN de la tarjeta de línea destino de la ruta de trabajo detectan una falla total en la trama, declaran la ruta en estado SF (Signal Failure) y efectúan inmediatamente la conmutación a la ruta de protección.

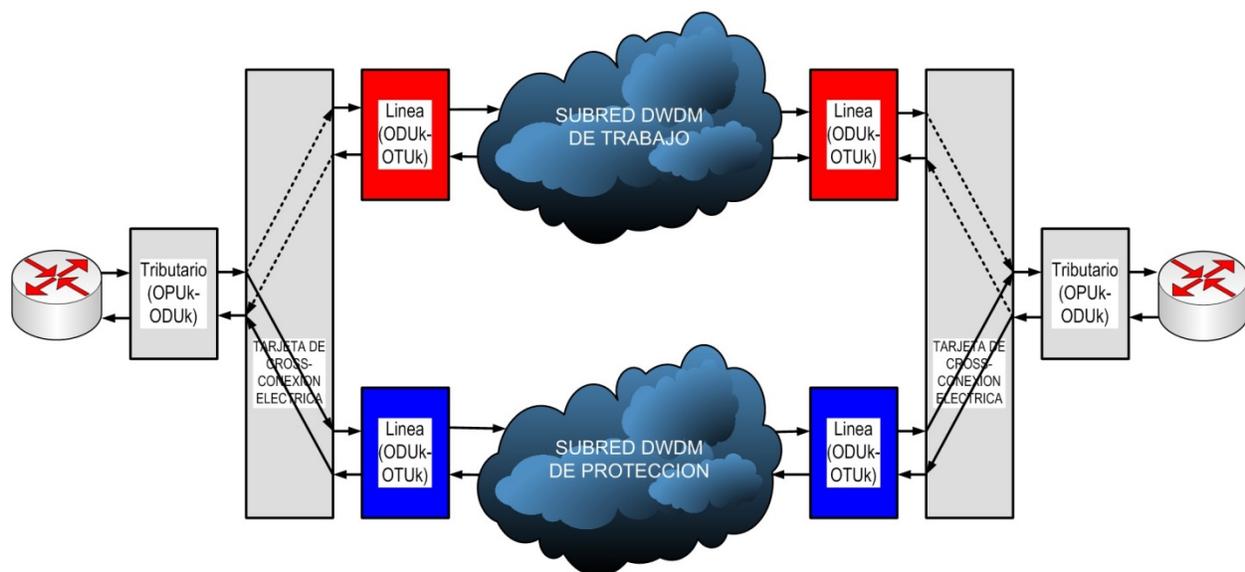


Figura 28: Protección ODUK-SNCP en estado conmutado.

Una vez conmutada la protección, el servicio solo regresara a la ruta de trabajo original siempre y cuando la misma se encuentre reestablecida del fenómeno que origino su cambio de estado y la protección ODUK-SNCP este configurada como revertiva. De otro modo el servicio permanecerá en la ruta de Protección hasta que haya algún cambio de estado en la misma. Si ambas rutas están interrumpidas, el servicio se interrumpirá hasta que alguna ruta reestablezca.

Una desventaja de la protección ODUK-SNCP es que involucra varias tarjetas como las tarjetas de control, de cross-conexión, de línea y tributarias para poder funcionar correctamente, con una tarjeta que no funcione, la protección podría no conmutar. Asimismo, al involucrar mucho hardware, su tiempo de conmutación es mayor que la protección OLP. Sin embargo ODUK-SNCP es muy versátil pues puede proteger un servicio no solamente a través de la misma red del cliente, sino también a través de la red de un tercero, asimismo soporta muchas regeneraciones óptico-eléctrico-óptico de sus señales OTUK, lo que le otorga mayor alcance.

CAPÍTULO 2: RED ÓPTICA DE CONMUTACIÓN AUTOMÁTICA (ASON)

Las redes ASON son una nueva generación de Redes de Transmisión Ópticas, que en comparación con las redes DWDM tradicionales, tienen ventajas en la velocidad de configuración de nuevos servicios, en la eficiencia de utilización de ancho de banda y en los esquemas de protección dinámicos. Las redes ASON han sido diseñadas para solucionar las principales limitantes de las redes ópticas DWDM tradicionales.

❖ Aprovisionamiento de Nuevos Servicios

Mientras que en las redes DWDM tradicionales, el aprovisionamiento o configuración de nuevos servicios punto a punto se hace de una manera discreta o semiautomática, conforme las redes van aumentando su complejidad, dicho aprovisionamiento es cada vez más complejo y lento, de tal forma que es necesario contratar a más personal lo cual incrementa los gastos, o bien, disminuye las ganancias para el operador.

ASON resuelve exitosamente el problema antes descrito gracias a su mecanismo automático de configuración de servicios punto a punto; para configurar un nuevo servicio, solo es necesario especificar los elementos de red origen y destino, el tipo de servicio, la velocidad y el tipo de protección. La red automáticamente busca y crea la(s) mejor(es) ruta(s) de acuerdo a criterios preestablecidos que pueden ser personalizables. Asimismo, ASON permite realizar Ingeniería de Trafico de tal manera que se puedan sincronizar lógicamente los cambios en la topología de la red.

❖ Eficiencia en la Utilización de Ancho de Banda

En las redes DWDM tradicionales existe una gran cantidad de recursos reservados estáticos, una falta de esquemas avanzados de protección y de funciones de enrutamiento. En contraste, las redes ASON pueden brindar protección reservando menores recursos, lo cual incrementa el rendimiento del ancho de banda general de la red.

❖ Protección Inteligente

Los esquemas de protección estáticos como OLP y ODUk-SNCP, son los más comunes en las redes DWDM tradicionales. Las redes ASON por su parte implementan mecanismos dinámicos de restauración de servicios, lo que permite a los mismos, en la medida de lo posible, sobrevivir a múltiples fallas en la red. De acuerdo a las diferencias en los Acuerdos de Nivel de Servicio (SLA) diferentes tipos de servicios están definidos en las redes ASON para satisfacer los diferentes requerimientos de Calidad de Servicio de múltiples clientes de manera simultánea.

2.1.: Teoría ASON DWDM

❖ Estructura de la Red de Transmisión ASON

De acuerdo a la normas emitidas por ITU-T, una red ASON consiste de un sistema de tres planos o capas en donde se agrupan las entidades de software y hardware que conforman la red ASON de acuerdo a su función y propósito de diseño. Estos planos son el Plano de Control, el Plano de Transporte y el Plano de Administración⁴.

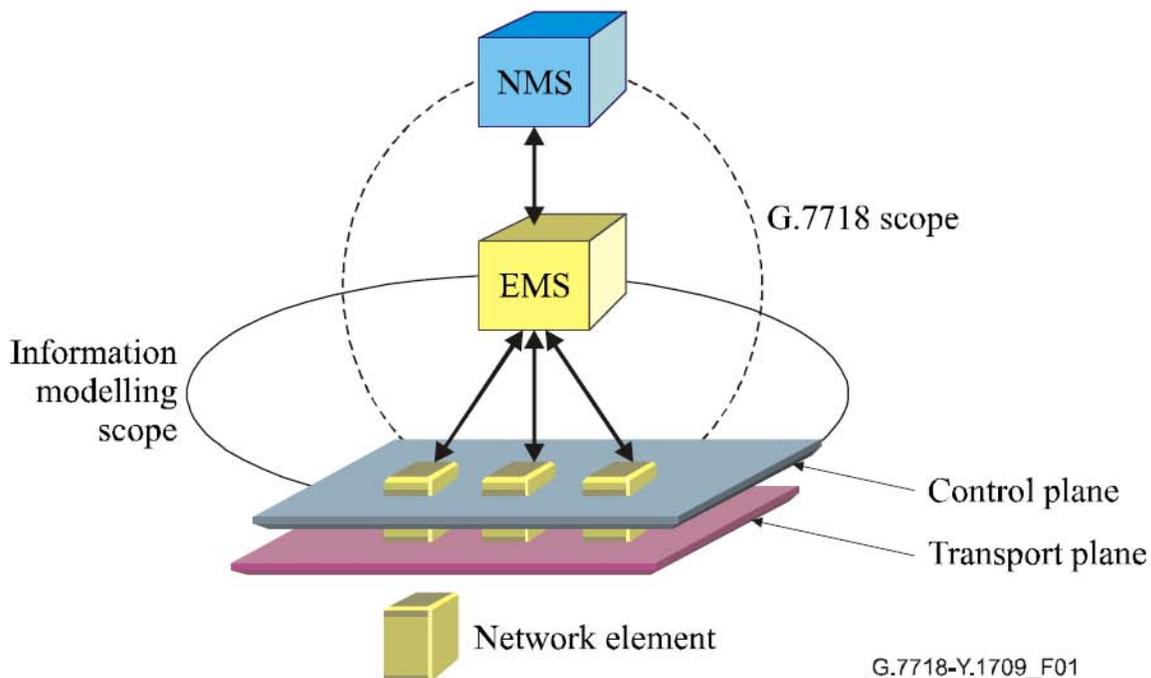


Figura 29: Estructura de la Red de Transmisión ASON.

⁴ Norma ITU-T G.7718: Framework for ASON management.

Las funciones más vanguardistas de ASON son posibles gracias al uso de un Plano de Control independiente al Plano de Transporte. El Plano de Control es un paradigma en las redes ópticas tradicionales pues donde se realiza la implementación automática del acomodo de recursos de ancho de banda y creación dinámica de servicios punto a punto. Un servicio punto a punto en una red ASON también es conocido como LSP o ASON Trail.

Las funciones de los tres planos o capas de ASON se describen a continuación.

- El Plano de Transporte

El Plano de Transporte de una red ASON puede considerarse equivalente a una red DWDM tradicional. En este plano se multiplexan y transmiten las señales ópticas, se configuran las cross-conexiones y suceden las conmutaciones por protección. Estas conmutaciones se realizan bajo el control del Plano de Administración y el Plano de Control.

- El Plano de Control

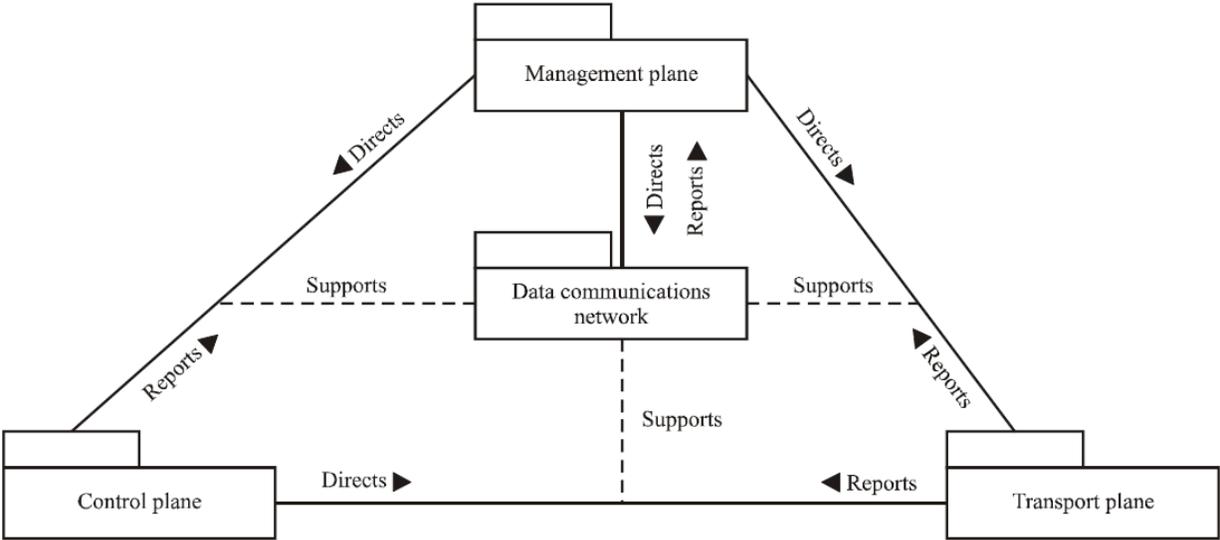
El Plano de Control controla dinámicamente las conexiones de red y al plano de transporte, mediante el intercambio de información de señalización, incluyendo la configuración, la reservación o liberación de recursos, el monitoreo de las conexiones, el mantenimiento de las conexiones, el aprovisionamiento y la administración de la protección de la red ASON⁵.

- El Plano de Administración

El Plano de Administración es un complemento del Plano de Control, tiene la función de dar mantenimiento a los otros dos planos y a todo el sistema en su conjunto. En este plano sucede la configuración punto a punto de los servicios o ASON Trails. Asimismo, aquí es donde se administra el desempeño de la red, el análisis de fallas, la seguridad y la configuración a nivel de red de todo el sistema ASON. Las Funciones del plano de Administración están coordinadas con las funciones de los otros dos planos. En este plano se ubica el Sistema de Administración de Red del proveedor de equipos de transmisión donde el usuario hace cambios en la red ASON de manera remota.

⁵ Norma ITU-T G.7716: Control Plane for ASON Networks.

Los tres planos son independientes pero interactúan unos con otros a través de interfaces con funciones definidas.



G.7718-Y.1709_F03

Figura 30: Relación entre las capas de la red ASON.

El plano de Administración se comunica con el Plano de Control a través de las Interfaces de Administración de Red (NMIs). El Plano de Control se comunica con el Plano de Transporte mediante las Interfaces de Control de Conexión (CCIs).

❖ Estructura de Software ASON

El software ASON está formado de distintos módulos, cada uno con funciones específicas. El Plano de Administración ASON se ubica en la Capa de Administración de Red (NM). El Plano de Transporte es la red DWDM tradicional sobre la que se implementa ASON. El Plano de Control también se encuentra en el hardware de la red DWDM tradicional, pero es un bloque de software separado y conocido como Software ASON, que se encuentra latente hasta el momento en que es activado; el Software ASON utiliza a su vez los protocolos LMP, OSPF-TE y RSVP-TE.

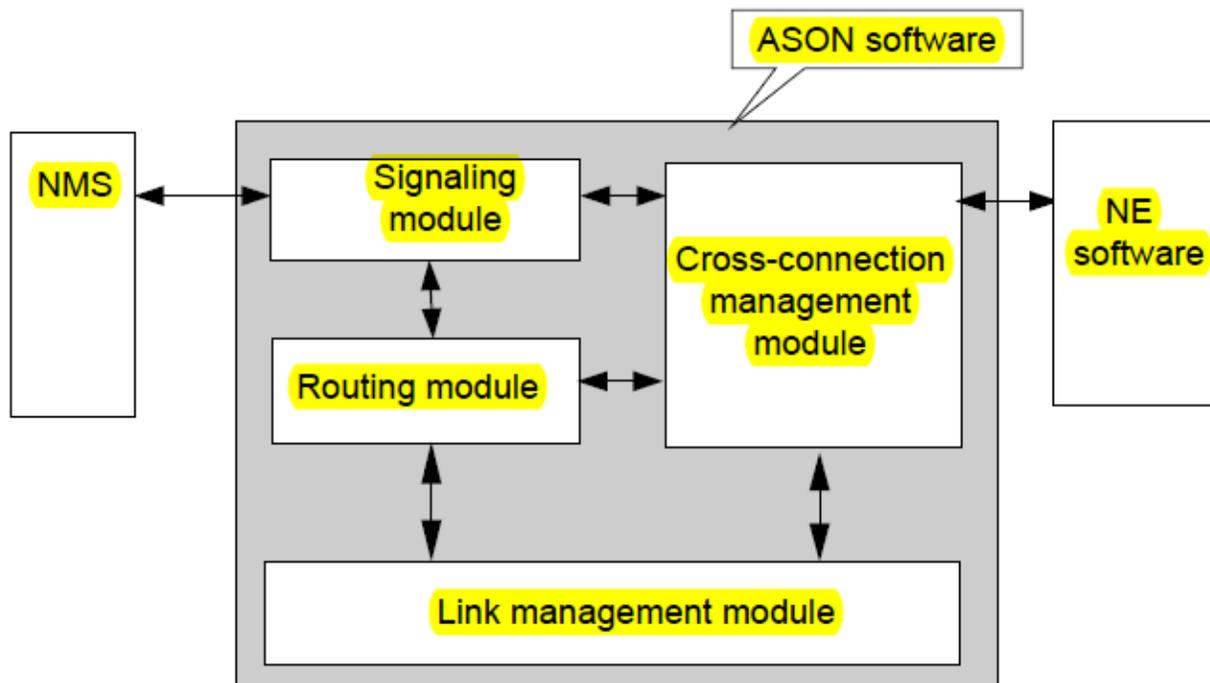


Figura 31: Estructura del software ASON.

- Módulo de Administración de Enlace

El Módulo de Administración de Enlace utiliza el protocolo LMP para realizar las funciones de crear y mantener los Canales de Control. Asimismo verifica el correcto funcionamiento de los enlaces de Ingeniería de Trafico (TE Links).

- Módulo de Señalización

El módulo de señalización utiliza el protocolo RSVP-TE para crear, eliminar, sincronizar y restaurar servicios de acuerdo a las necesidades de los usuarios o clientes⁶.

⁶ Norma ITU-T G.7713: Signaling for ASON Networks.

- Módulo de Enrutamiento

El módulo de enrutamiento utiliza el protocolo OSPF-TE para descubrir la información del estado actual de los TE Links, descubrir la información de estado actual de los Enlaces de Control y calcular las Rutas de Control. El módulo de enrutamiento utiliza principalmente el protocolo CSPF para calcular las rutas de los servicios basado en información acerca del estatus actual de los TE Links⁷.

- Módulo de Administración de Cross-conexiones

Módulo de Administración de Cross-conexiones realiza las funciones de creación y eliminación de cross-conexiones. Asimismo reporta el estado de los enlaces mediante alarmas.

❖ Protocolo ASON

La maqueta de pruebas elaborada utiliza el protocolo LMP para administrar tanto los Enlaces de Control como los Enlaces de Ingeniería de Trafico, el protocolo OSPF-TE como protocolo de enrutamiento y el protocolo RSVP-TE como protocolo de señalización.

- LMP

Cuando el protocolo LMP se utiliza para crear y mantener los Canales de Control (Control Links) entre nodos adyacentes, utiliza los bytes DCC de la trama OTN (en el caso de ASON eléctrico) o los bytes DCC (en el caso de ASON óptico) para transmitir mensajes entre Elementos de Red contiguos de tal manera que se pueda establecer entre ellos un enlace de control con un identificador específico. Cuando el protocolo LMP se utiliza para verificar la consistencia de los enlaces de Composición e Ingeniería de Trafico (TE Links), una prueba de consistencia de atributos entre los dos puertos terminales es ejecutada de tal manera que los TE Links creados manual o dinámicamente estén idénticamente configurados. Si esta prueba es exitosa, el protocolo OSPF es usado para descubrir la topología y recursos de la toda la red ASON.

Después de que una tarjeta lógica es creada en un Elemento de Red ASON, el software ASON crea Enlaces de Composición para las interfaces ópticas de la tarjeta creada, entonces, los atributos de los Enlaces de Composición son configurados de acuerdo a los atributos de dichas interfaces ópticas. Dentro de estos atributos están los números de slot, el ancho de banda y el Node ID. Después de que los Enlaces de Composición son creados, el software ASON crea los TE Links correspondientes⁸.

⁷ Norma ITU-T G.7715: Architecture and requirements for routing in the Automatically Switched Optical Networks.

⁸ Norma IETF RFC 4204: Link Management Protocol (LMP).

- OSPF-TE

El Plano de Control de la red ASON construida, utiliza el protocolo OSPF-TE, el cual es un protocolo extendido de OSPF, el cual tiene las función de realizar las tareas de enrutamiento de los Enlaces de Control de tal manera que mediante la comunicación e identificación de los Elementos de Red vecinos, se pueda generar información acerca de las rutas que son requeridas para reenviar mensajes en el plano de control y poder tener actualizada la topología de control de la red.

Asimismo recolecta información sobre el estatus actual de los Enlaces de Ingeniería de Trafico en el Plano de Transporte. El protocolo entonces genera información acerca de la topología de servicios de la red para el cálculo de la ruta de los LSPs o ASON Trails que serán configurados desde el Plano de Administración⁹.

- RSVP-TE

El protocolo RSVP-TE es un protocolo de señalización utilizado para la reservación de recursos. Sus principales funciones son la creación, eliminación, modificación, re-enrutamiento y optimización de los LSP (Label Switched Path). Los LSP también son conocidos como ASON Trails y son los túneles por donde circulan los circuitos transportados por la red ASON¹⁰.

❖ Enlaces ASON para OTN

Como parte del proceso de configuración de una red ASON, es necesario descubrir tres tipos de enlaces sobre los que se construirán los servicios punto a punto o ASON Trails. Estos tres enlaces son los Canales de Control, los Enlaces de Control y los Enlaces de Ingeniería de Trafico.

⁹ Norma IETF RFC 4203: OSPF Extensions in support of Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS).

¹⁰ Norma IETF RFC 3473: Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering (RSVP-TE) Extensions.

- Canales de Control

El protocolo LMP crea y mantiene funcionando los Canales de Control entre los Elementos de Red. El Canal de Control entonces proporciona un enlace lógico a través de cual circulan los paquetes LMP. Los canales de control están clasificados como en-banda o fuera-de-banda. Los canales en-banda utilizan automáticamente bytes específicos de la trama OTN. Los canales fuera de banda utilizan una red TCP/IP diferente a la red ASON en cuestión.

A estos Canales de Control también se les conoce como Canales de Gestión y deben de estar funcionando siempre y cuando se requiera hacer algún cambio de configuración en la red o solicitar información sobre el estatus y desempeño de la misma. Al menos un Canal de Control debe de estar presente entre dos Elementos de Red adyacentes. Si hay varios OCh entre dos Elementos de Red adyacentes, entonces varios Canales de Control pueden ser creados.

Los protocolos OSPF y RSVP transmiten información a través de los bytes GCC o RES de la trama OTN cuando se tiene una gestión en-banda. A continuación se ilustra la posición del byte RES en la trama OTN¹¹.

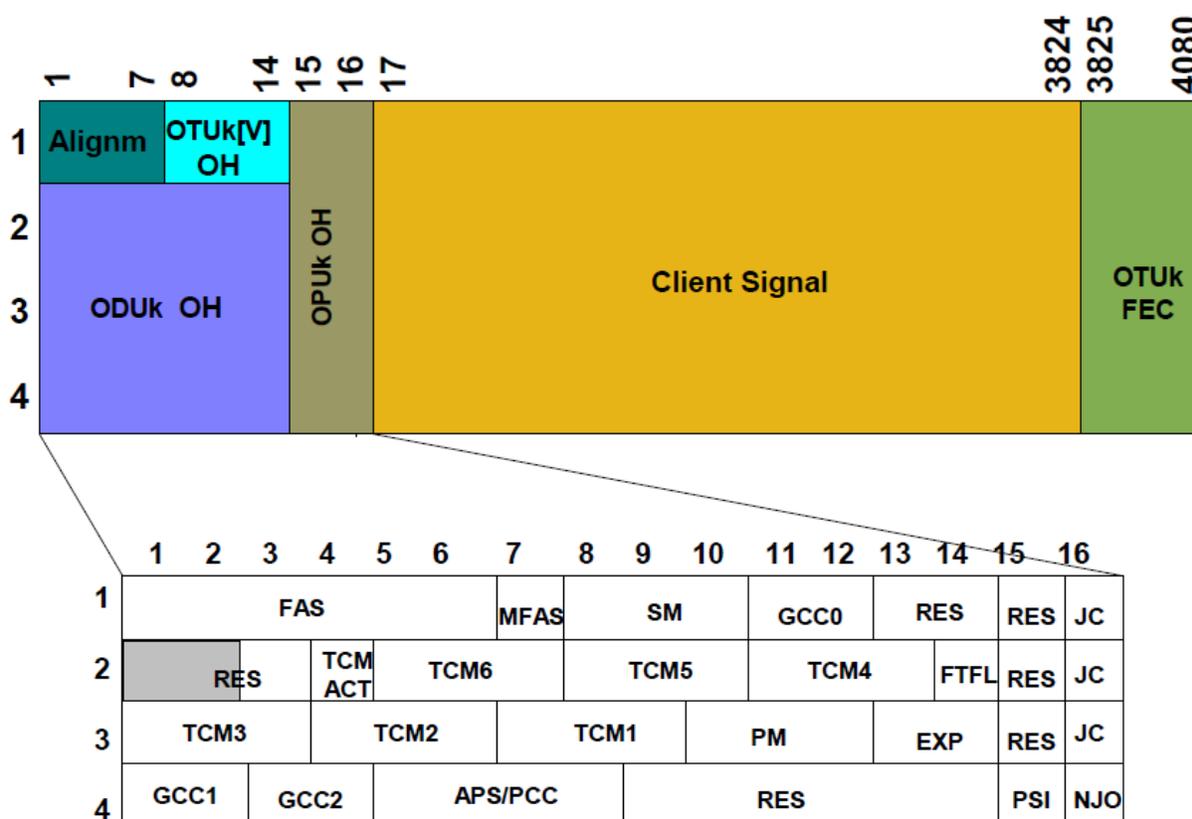


Figura 32: Ubicación de los bytes que transportan la información ASON en la trama OTN.

¹¹ Norma ITU-T G.7712: DCN for ASON Networks.

- Enlaces de Control

Los Enlaces de Control son los enlaces de comunicación creados entre las entidades de software ASON de los Elementos de Red que componen el dominio ASON.

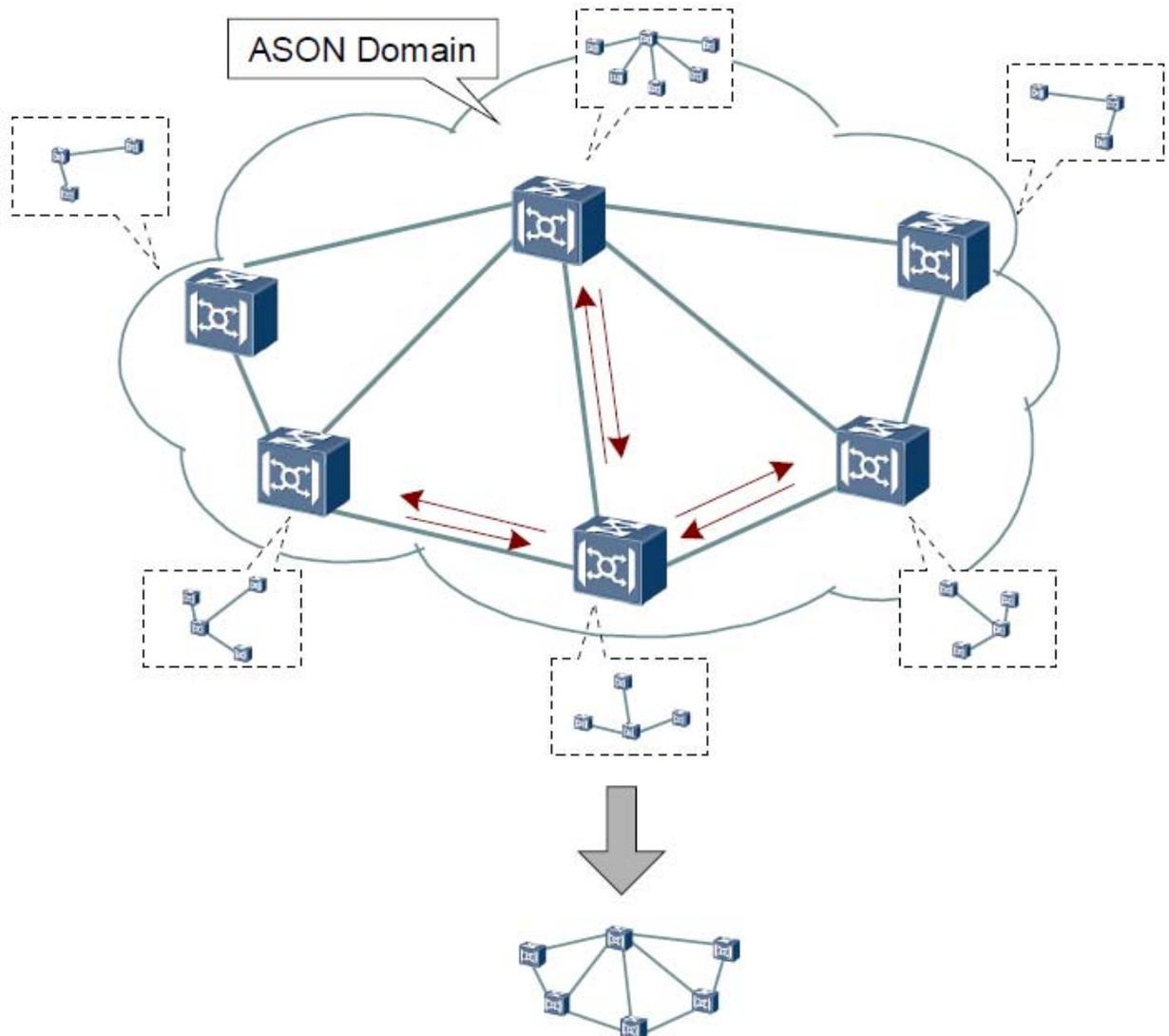


Figura 33: Descubrimiento automático de los Enlaces de Control en un dominio ASON.

Los Enlaces de Control son encontrados mediante el protocolo OSPF de tal forma que la información sobre la topología de control de la red sea conocida por todos los Elementos de Red. El protocolo OSPF de cada Elemento calcula la ruta de control más corta a cada Elemento de Red, las rutas son entonces almacenadas en una tabla de enrutamiento. Entonces el protocolo RSVP utiliza estas rutas para transmitir mensajes de señalización.

- Enlaces de Ingeniería de Trafico (TE Links)

Un TE Link es un Enlace de Ingeniería de Trafico. Un Elemento de Red transmite su información de ancho de banda a otros Elementos de Red en una red ASON en el formato de un TE Link, de tal forma que la red sea consciente de los recursos con los que dispone. Cuando un par de tarjetas OTU o de línea se encuentran comunicadas a través de una red ASON OTN, generan un TE Link específico dependiendo de su posición en el sistema DWDM y de su velocidad de transferencia. Los TE Links se pueden clasificar en OMS, OTUk y ODUk; donde $k = 1, 2, 3, 4$ ¹².

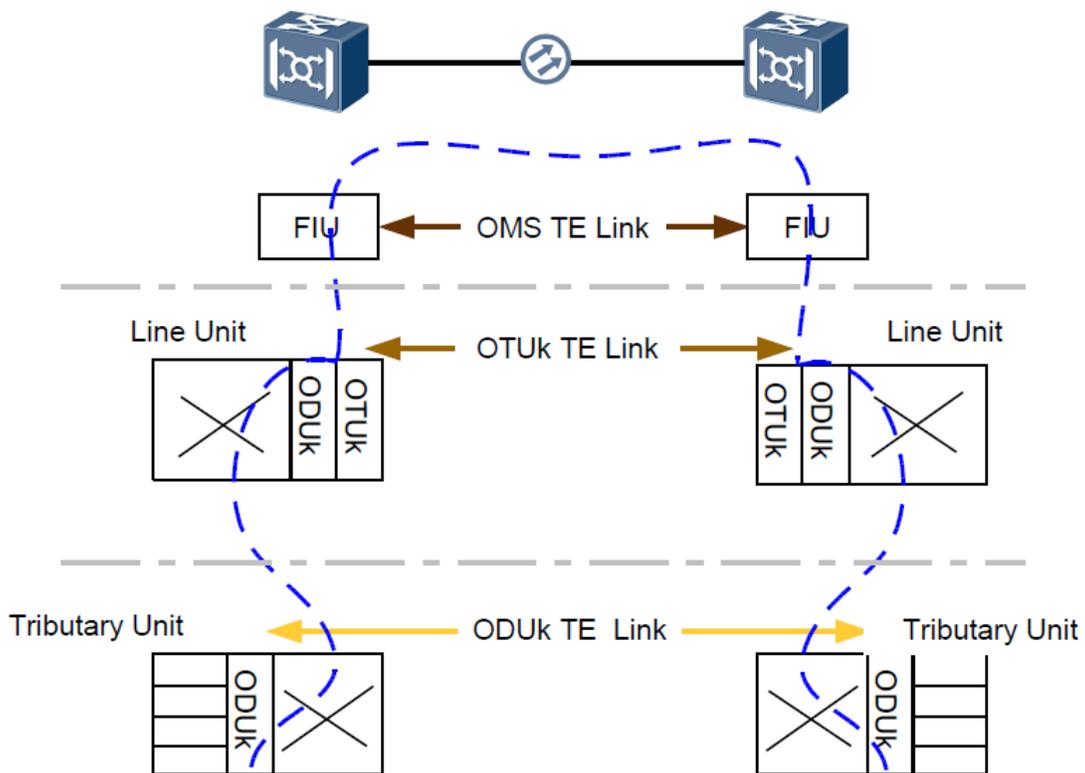


Figura 34: Composición de un TE Link en términos de la trama OTN.

¹² Norma IETF RFC 3473: Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering (RSVP-TE) Extensions.

- LSP

Un LSP, también conocido como ASON Trail, es una trayectoria física y lógica con valores de frecuencia y el tiempo específicos por donde atraviesa el servicio final en una red de transporte ASON OTN. Dichos valores de tiempo y de frecuencia pueden variar de fibra óptica a fibra óptica por donde atraviese dicho LSP, de tal forma que este LSP pueda coexistir con otros LSP sin interferirse mutuamente.

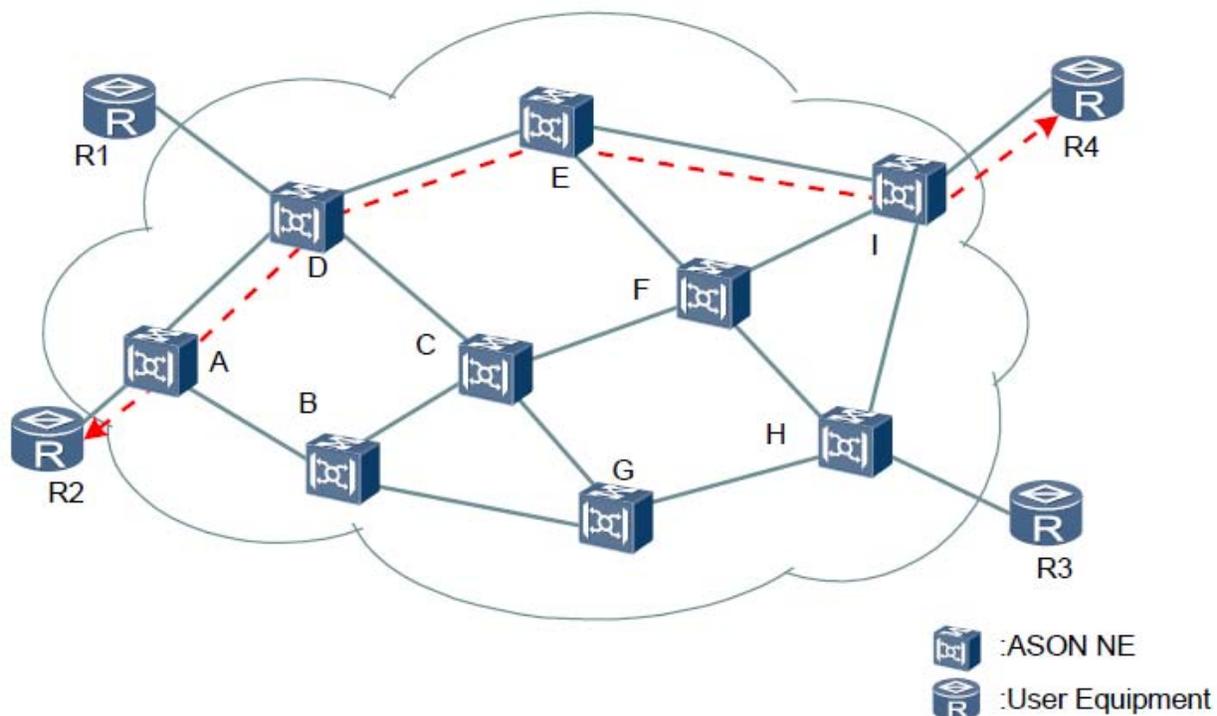


Figura 35: Label Switched Path.

- Restauración y Re-Enrutamiento de LSP

Dependiendo del tipo de LSP o bien del SLA del servicio protegido, el servicio es conmutado a una ruta de respaldo al haber un evento de afectación de señal (SF) o de degradación de señal (SD) en el LSP original. A este mecanismo se le llama restauración del LSP.

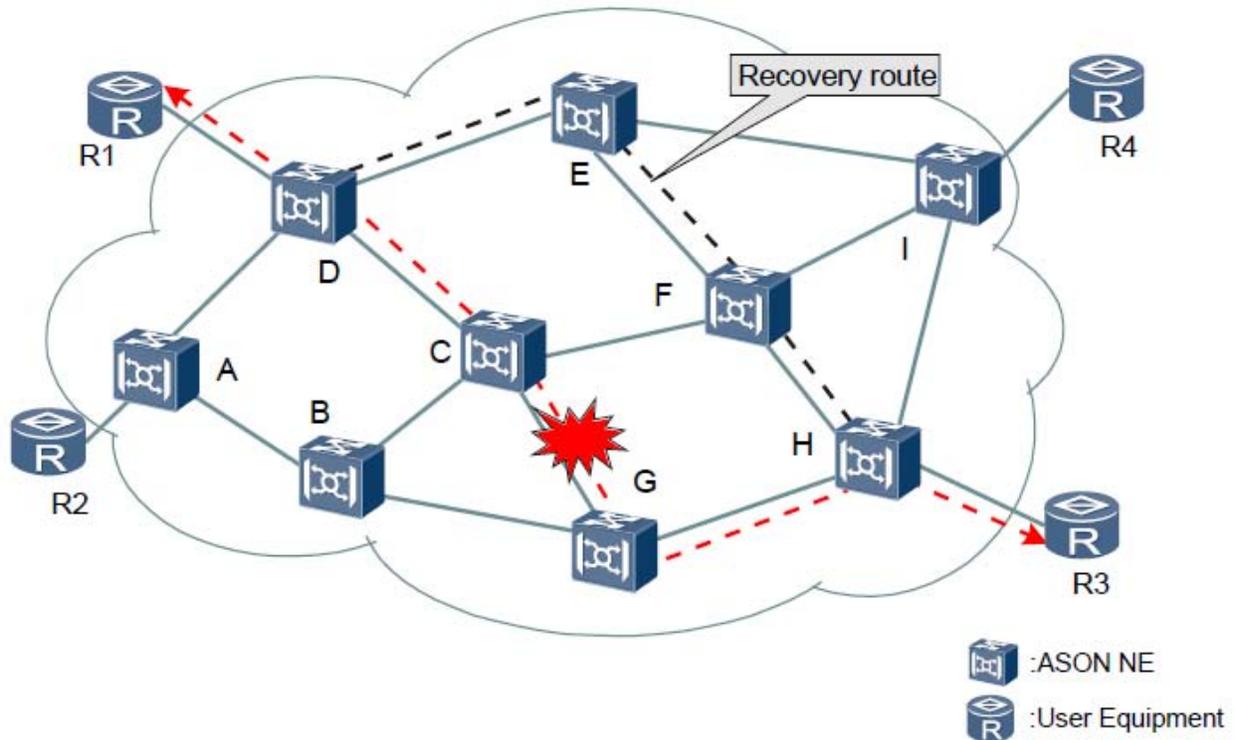


Figura 36: Restauración de LSP.

Cuando un LSP es configurado sobre una serie de TE Links de manera automática, se aplica un enrutamiento inicial en dicho LSP, pero cuando a ese servicio se le otorga una protección, un ruta de respaldo puede ser reservada antes o después de una falla en el LSP original de acuerdo al tipo de servicio ASON. A este mecanismo se le conoce como Re-Enrutamiento del LSP¹³.

¹³ Norma IETF RFC 4426: Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Recovery Functional Specification.

- LSP Revertivo

Un LSP Revertivo regresa a su ruta de trabajo original una vez que la falla que provocó la conmutación es solucionada. Este atributo de protección se utiliza cuando la ruta del LSP original es estable. Cuando el LSP original no es estable, se recomienda que el servicio sea No-Revertivo, para evitar que el servicio este conmutando de Trabajo a Protección y viceversa constantemente, lo cual provocaría intermitencias al mismo.

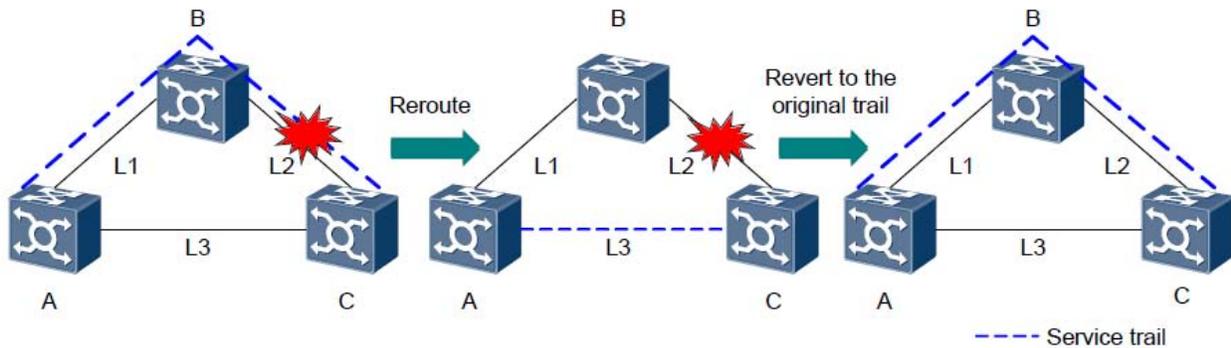


Figura 37: LSP Revertivo.

2.2.: Tipos de servicios ASON

El Proveedor de Equipos de Transmisión con el que se realizó la maqueta ASON define tres principales tipos de servicio con diferentes Niveles de Servicio (SLA). Estos tipos de servicios tienen varios parámetros configurables lo que permite crear variantes de cada uno de los mismos.

❖ Diamond

Los servicios del tipo Diamond tienen el mejor mecanismo de protección. Cuando hay suficientes recursos en la red ASON, los servicios Diamond proveen una protección 1+1 permanente a la señal cliente. Este tipo de servicio es aplicable a señales tanto de voz como de datos y está diseñado para ser utilizado en bancos, la industria aeroespacial, la seguridad nacional, redes privadas VIP y otras aplicaciones de alta relevancia.

Justo después de la configuración de un servicio Diamond, hay dos diferentes LSPs disponibles entre los Elementos de Red origen y destino. Estos dos LSPs deben estar lo más separados posible, uno es el LSP de Trabajo y el otro es el LSP de Protección. La señal cliente es transmitida a través de ambos LSPs al mismo tiempo. Si el LSP de Trabajo no tiene problemas, el nodo de destino recibe la señal de este LSP, de otra forma lo recibirá por el LSP de Protección.

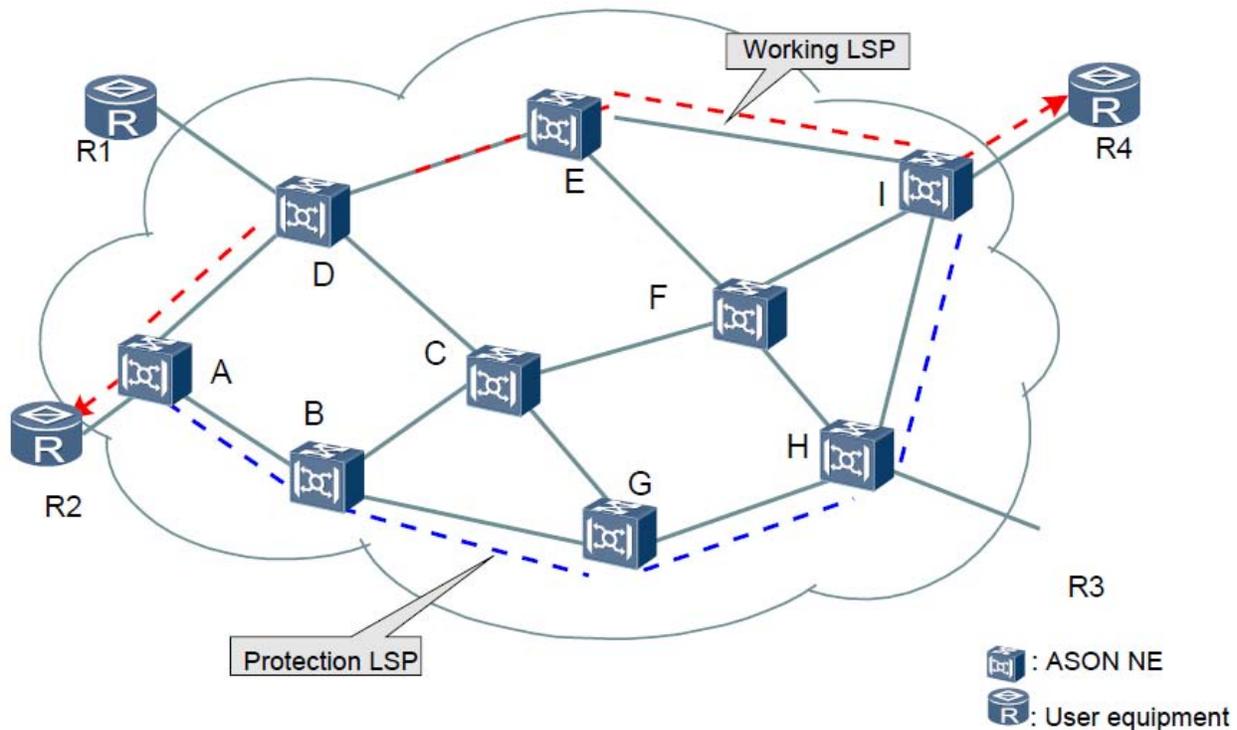


Figura 38: Servicio Diamond.

- Diamond Con Re-Enrutamiento Tras Falla de 1 LSP

Esta variante del servicio Diamond es la forma más robusta de este tipo de servicio y también es la que más recursos necesita. Durante la configuración de este servicio se calculan los LSPs de Trabajo y Protección. Cuando sucede una falla en cualquiera de esos dos LSPs, el re-enrutamiento es accionado con el objetivo de buscar una ruta alternativa a las dos primeras para la creación de un nuevo LSP de respaldo, por si el servicio volviera a fallar. Si el primer LSP que falla es el de Trabajo, el sistema conmuta el servicio al LSP de Respaldo, que en ese momento se convierte en el de Trabajo al mismo tiempo que realiza el re-enrutamiento que creara al nuevo LSP de protección. Si el servicio está configurado como Revertivo, el LSP de Trabajo original permanecerá latente; si el servicio está configurado como No-Revertivo, el LSP de Trabajo original será eliminado. Es importante mencionar que mientras existan recursos suficientes, el servicio del cliente solo estará interrumpido el tiempo que dure la conmutación, que siempre será menor al tiempo de re-enrutamiento.

- Diamond Con Re-Enrutamiento Tras Falla de 2 LSP

Durante la configuración de este servicio, se calculan los LSPs de Trabajo y Protección. Cuando sucede una falla en el LSP de Trabajo, el servicio será conmutado al LSP de Protección y ningún re-enrutamiento será accionado hasta que el LSP de protección también falle. Si el servicio está configurado como Revertivo, el LSP de Trabajo original permanecerá latente; si el servicio está configurado como No-Revertivo, el LSP de Trabajo original será eliminado. En el caso de la primera falla, el servicio del cliente estará interrumpido solamente el tiempo que dure una conmutación, en el caso de la segunda falla y de las fallas subsecuentes, dicho servicio estará interrumpido durante el tiempo que dure el re-enrutamiento más la conmutación.

- Diamond Sin Re-Enrutamiento

Durante la configuración de este servicio, se calculan los LSPs de Trabajo y Protección. Cuando sucede una falla en el LSP de Trabajo, el servicio será conmutado al LSP de Protección y ningún re-enrutamiento es accionado. Cuando falle el LSP de Protección, el re-enrutamiento tampoco es accionado y el servicio cliente se interrumpe.

❖ Silver

Los servicios del tipo Silver son recomendables para aplicaciones de datos que no requieran trabajar en tiempo real, como Internet. Un servicio Silver se refiere a la conexión entre un nodo origen y otro de destino con el atributo de re-enrutamiento. Estos servicios también son llamados servicios re-enrutados puesto que durante la configuración de los mismos solo se define solo un LSP el cual al momento de fallar, es conmutado a otro LSP alternativo que es calculado al momento de la falla mediante el proceso de re-enrutamiento. Los servicios Silver calculan el LSP de restauración en tiempo real, por lo tanto no es necesaria la reservación previa de un recurso, esto incrementa el rendimiento del ancho de banda de la red, pero aumenta el tiempo de restauración del servicio.

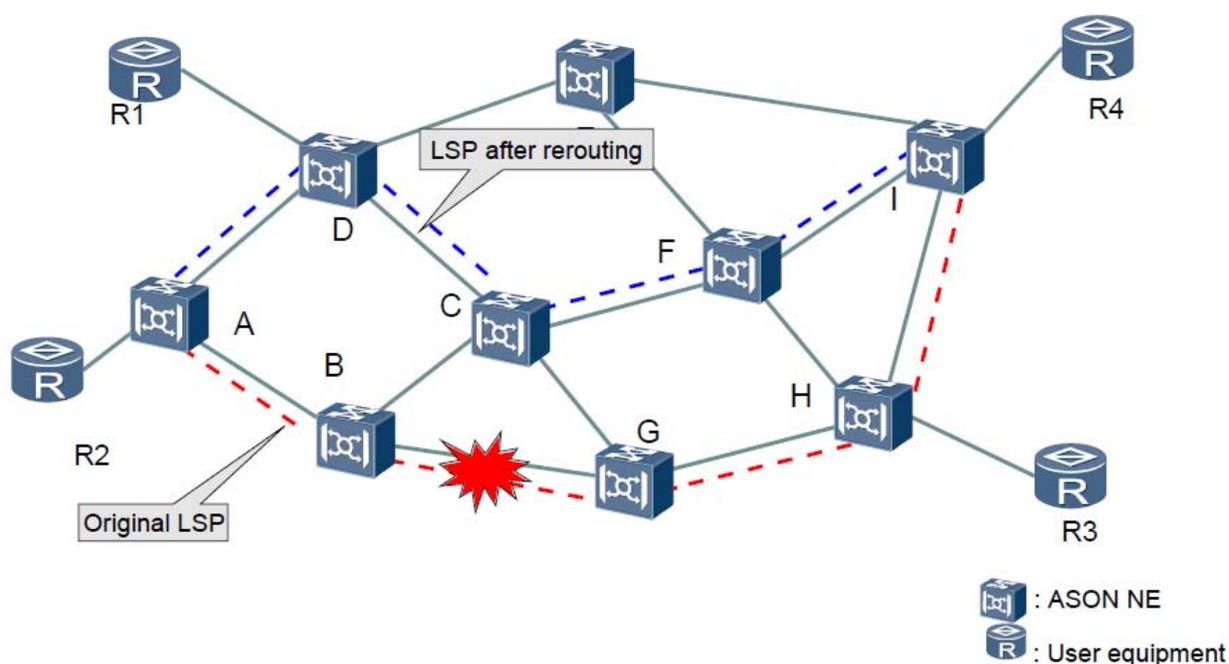


Figura 39: Servicio Silver.

- Silver Revertivo

En esta variante, al haber una falla en el LSP activo del servicio Silver, el re-enrutamiento es accionado, al encontrarse una ruta alternativa, el servicio cliente entonces es conmutado. El LSP original queda entonces latente por si llegara a ser reestablecido, en ese caso el servicio cliente seria regresado al LSP original tras un tiempo configurable llamado WTR. El tiempo que el servicio cliente se encuentra interrumpido tras una falla en el LSP activo, es igual a la suma del tiempo de re-enrutamiento más el tiempo de conmutación. De no encontrarse recursos suficientes para realizarse el re-enrutamiento, el servicio cliente es interrumpido definitivamente a menos que el LSP original restablezca.

- Silver No-Revertivo

En esta variante, al haber una falla en el LSP activo del servicio Silver, el re-enrutamiento es accionado, al encontrarse una ruta alternativa, el servicio cliente entonces es conmutado y el LSP original es eliminado. De no encontrarse recursos suficientes para realizar el re-enrutamiento, el servicio cliente es interrumpido definitivamente.

- Silver No-Revertivo Con LSPs de Distinto Costo

En esta variante, al haber una falla en el LSP activo del servicio Silver, el re-enrutamiento es accionado, al encontrarse una ruta alternativa, el servicio cliente entonces es conmutado y el LSP original es eliminado. De no encontrarse recursos suficientes para realizar el re-enrutamiento, el servicio cliente es interrumpido definitivamente. Cuando se realiza un re-enrutamiento, el Plano de Control elige el(los) los TE Link(s) disponible(s) con menor costo para construir el nuevo LSP.

- ❖ Cooper

Los servicios Cooper son recomendados para aplicaciones no críticas o bien temporales, como por ejemplo para aumentar la capacidad de transporte de un enlace específico de la red durante algún evento extraordinario como puede ser un día festivo o fecha significativa. Los servicios Cooper no están protegidos, por lo tanto si el LSP activo falla, el servicio se verá interrumpido hasta que el mismo LSP sea restaurado.

- ❖ Iron

Los servicios Iron también son recomendados para aplicaciones no críticas o bien temporales, como por ejemplo para aumentar la capacidad de transporte de un enlace específico de la red durante eventos extraordinarios. Los servicios Iron no están protegidos, por lo tanto si el LSP activo falla, el servicio se verá interrumpido hasta que el mismo LSP sea restaurado. Cuando existen servicios Silver o Diamond en el mismo dominio ASON que un servicio Iron, el LSP del servicio Iron puede ser utilizado durante el re-enrutamiento de algún otro servicio en caso de existir ausencia de recursos, en ese caso el servicio cliente que utiliza el servicio Iron es Interrumpido.

CAPÍTULO 3: MAQUETA DE PRUEBAS

Si bien en otros países del mundo ya existen redes DWDM+ASON con servicios reales funcionando desde hace varios años, en México apenas se está trabajando en la prueba y homologación de las primeras redes de estas características. En México existen una gran cantidad de redes DWDM tradicionales con esquemas de conmutación estáticos, cada vez es mayor el interés por implementar redes de transmisión con inteligencia que permitan simplificar la administración de las redes ópticas e incrementar la disponibilidad de servicios punto a punto de acuerdo a su importancia mediante la definición específica de la calidad de servicio de cada uno de los mismos.

Las redes DWDM+ASON generalmente cuentan con topologías de malla o anillo, con múltiples elementos de red y diferentes rutas de fibra óptica entre ellos. Sin embargo, debido tanto a los alcances de las pruebas ejecutadas como a los recursos disponibles en el laboratorio del proveedor del equipo de transmisión; la maqueta de pruebas consistió en dos elementos de red compuestos de dos repisas cada uno y tres enlaces bi-direccionales de fibra óptica entre ellos.

3.1.: Construcción de la red OTN+ASON de pruebas

Se construyó la siguiente topología de red con equipo DWDM del proveedor de equipo de transmisión en laboratorio. Las tres rutas de fibra óptica mostradas son bi-direccionales, pero se les representa con líneas individuales por simplicidad.

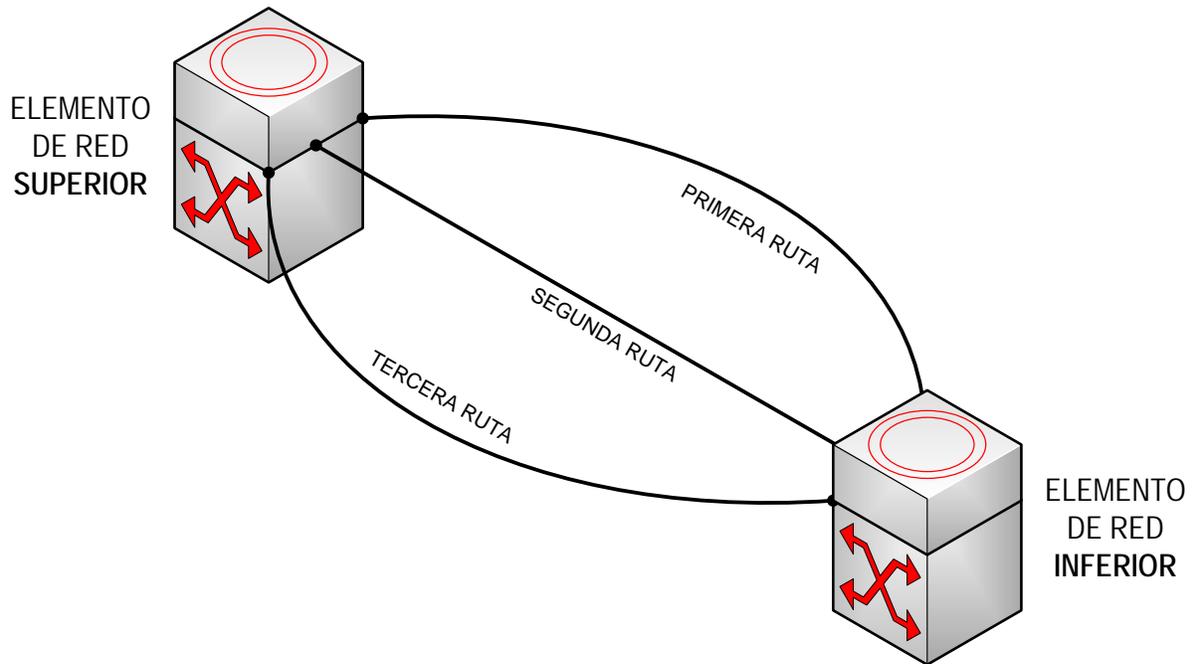


Figura 40: Topología de la Maqueta de Pruebas.

Tenemos en total dos elementos de red, cada uno de los cuales se compone de dos repisas conectadas entre sí por cable UTP en una arquitectura maestro-esclavo. Cada una de esas repisas cumple funciones específicas, en una de ellas están los componentes óptico-ópticos y en otra los óptico-electrónicos. En las siguientes imágenes podemos ver la estructura de hardware de cada uno de los elementos de red así como la forma en la cual se conectan las tarjetas de cada uno de los mismos.

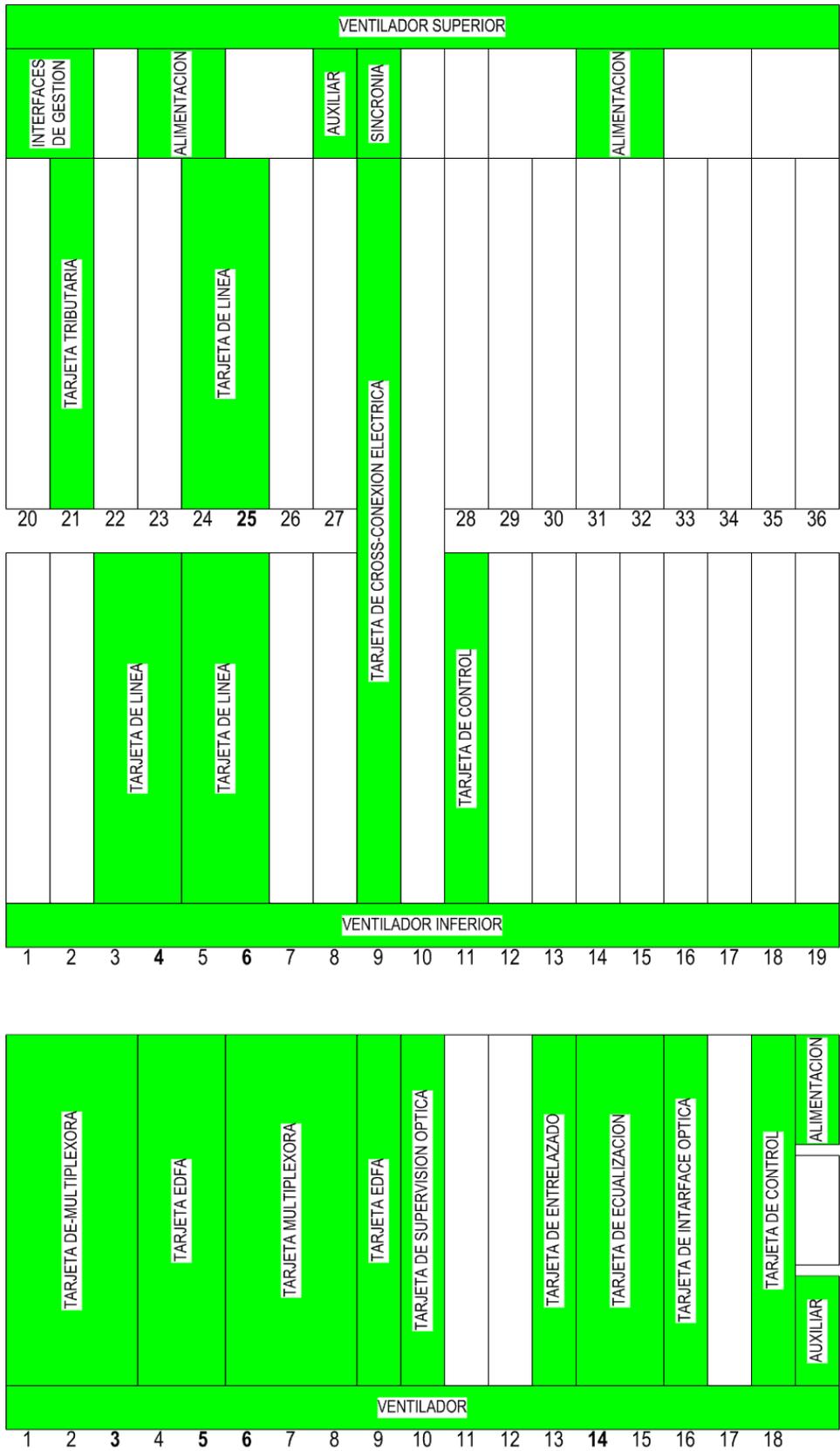


Figura 41: Hardware del Elemento de Red Superior.

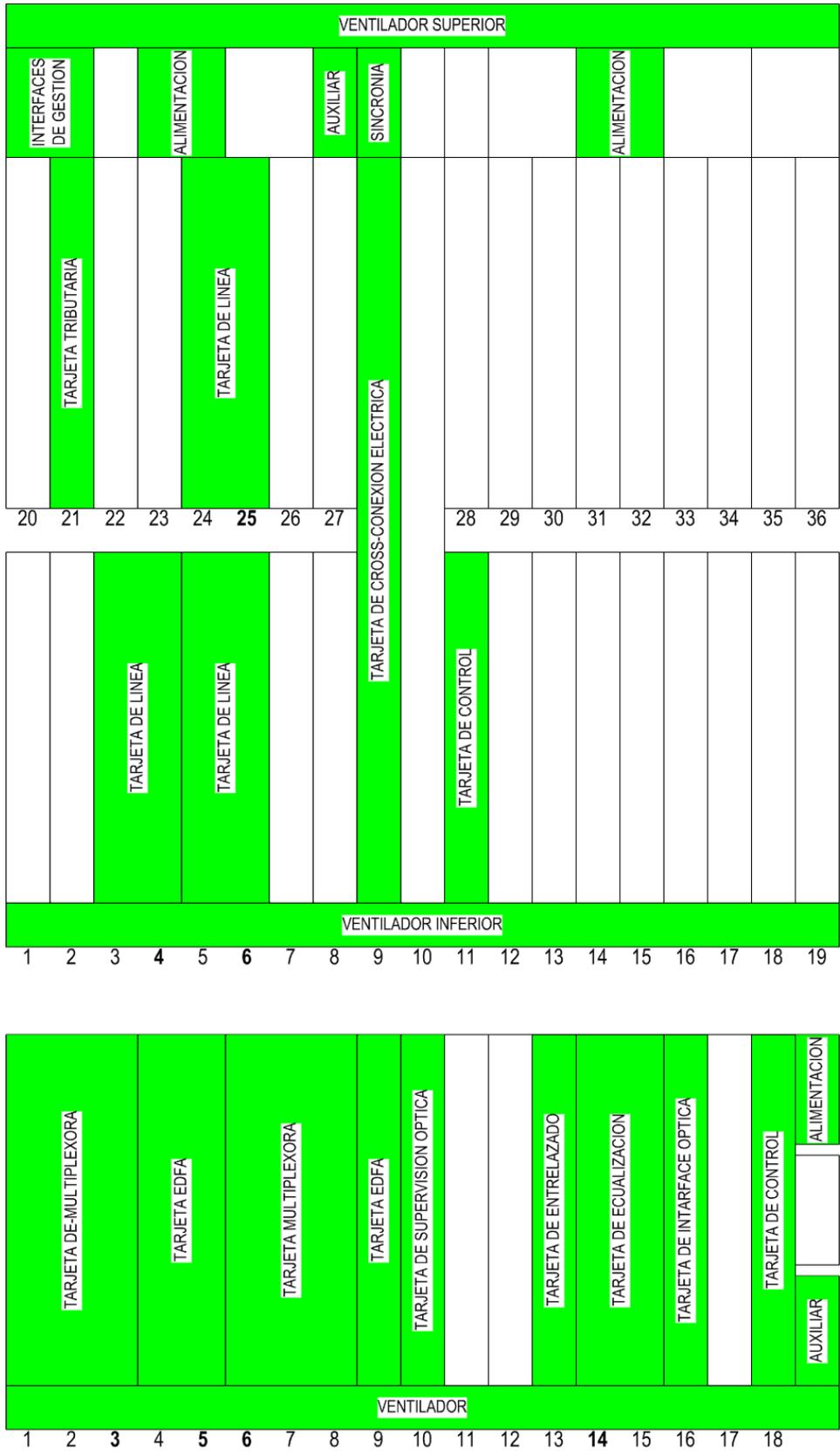


Figura 42: Hardware del Elemento de Red Inferior.

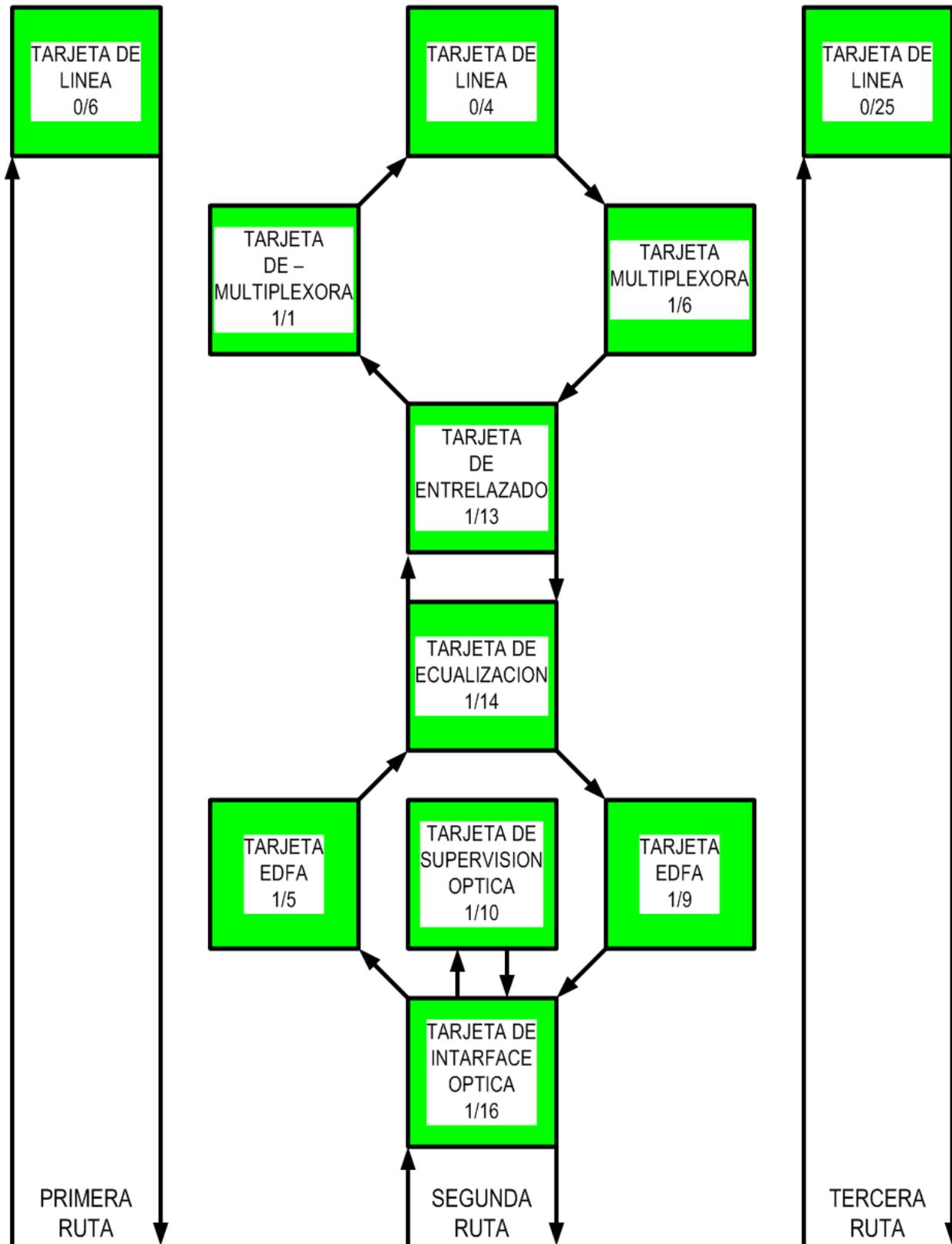


Figura 43: Diagrama de Flujo del Elemento de Red Superior.

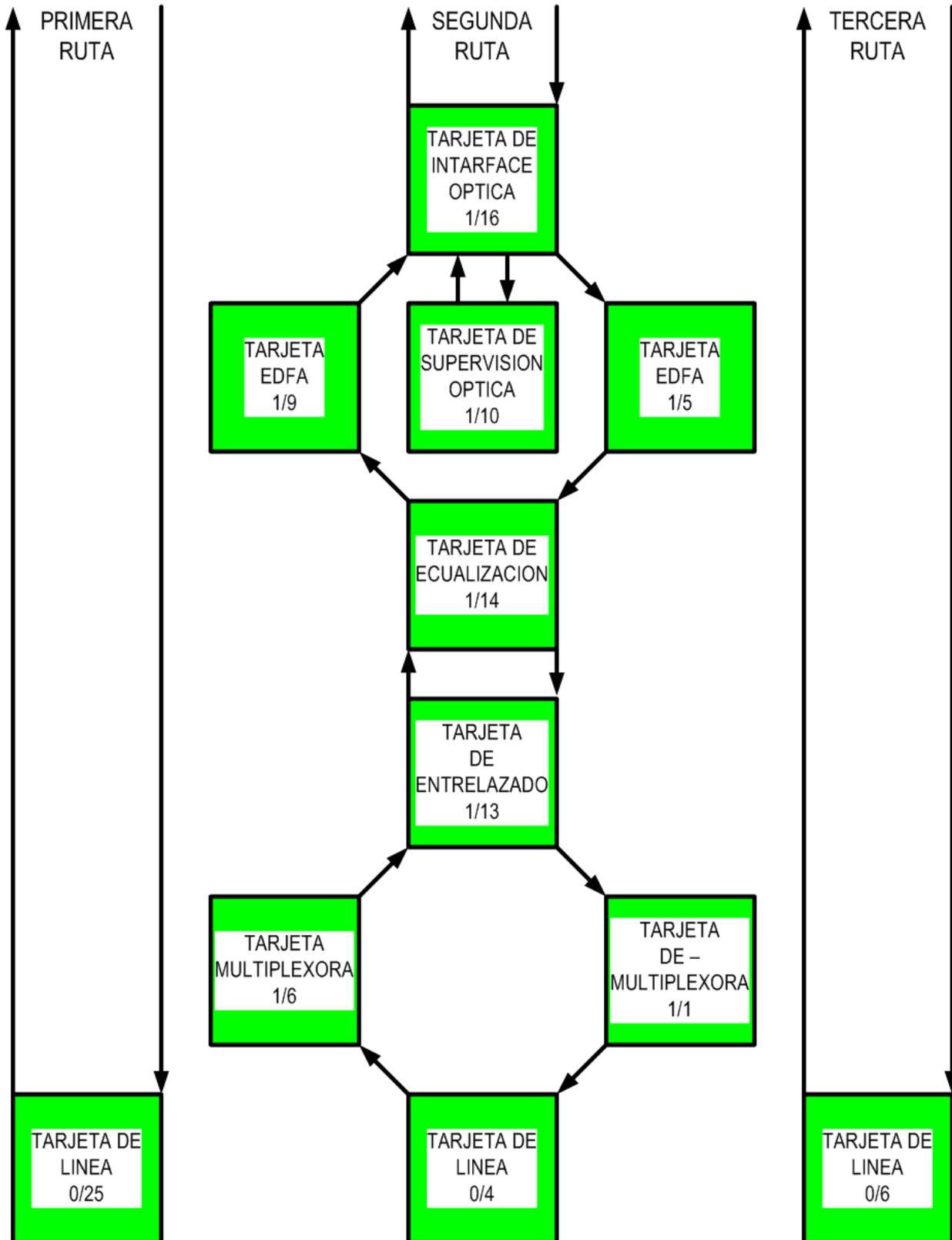


Figura 44: Diagrama de Flujo del Elemento de Red Inferior.

Las tarjetas tributarias transforman la señal óptica generada por el Equipo de Medición en una señal eléctrica OPU, esta señal es cross-conectada a una tarjeta de línea a nivel ODU para después ser transformada de nuevo a nivel óptico pero con encabezados OTU y ya con un color específico y poder ser mezclada con otras señales de otras tarjetas de línea, cada una con diferente color. A continuación se muestra el tipo de medios de transmisión utilizados para interconectar los distintos dispositivos y tarjetas utilizadas para construir la maqueta de pruebas:

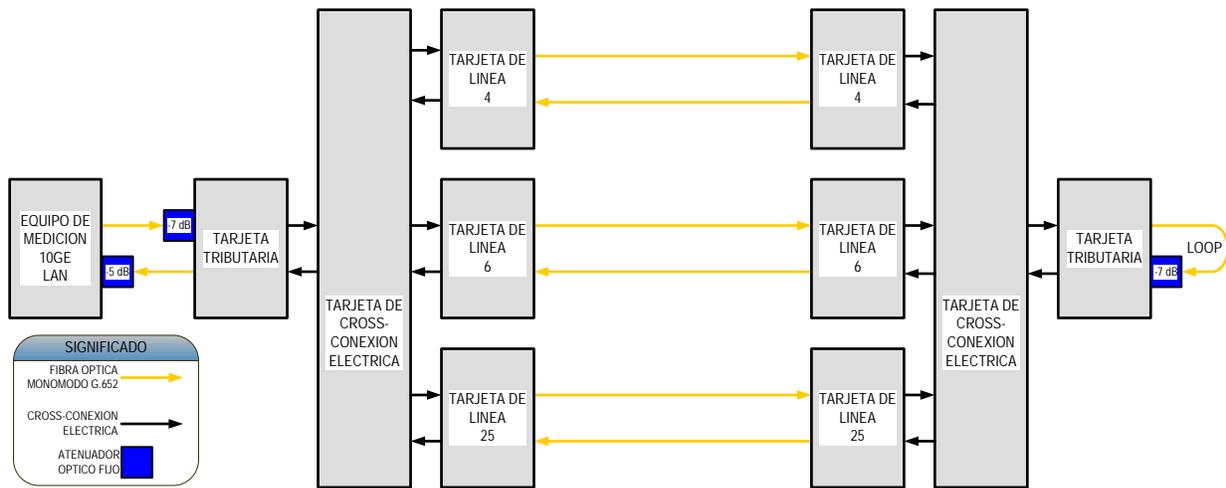


Figura 45: Tipos de medios de transmisión utilizados en la maqueta de pruebas.

Todos los jumpers de fibra óptica utilizados en la maqueta fueron de máximo 5 metros de longitud, sin embargo, en una red real el OCh entre tarjetas de línea mide comúnmente cientos de kilómetros a nivel óptico.

Los puertos ópticos de las tarjetas tributarias son la frontera de la maqueta DWDM de prueba, dichos puertos tienen las siguientes especificaciones técnicas:

Parámetro	Valor
Tipo de Modulo	10Gbps SFP+
Distancia Máxima	10 km
Longitud de Onda	1310 nm
Potencia Máxima de Transmisión	-1 dBm
Potencia Mínima de Transmisión	-6 dBm
Potencia Máxima de Recepción	+0.5 dBm
Potencia Mínima de Recepción	-14.4 dBm

Tabla 3: Especificaciones técnicas de los módulos SFP+ utilizados.

Mientras que la distancia máxima y la longitud de onda de operación de los puertos tributarios de las tarjetas tributarias son valores fijos, las potencias ópticas de transmisión y recepción tienen respectivamente un rango de valores que permiten cierta versatilidad en la manufactura y la instalación del dispositivo opto-electrónico, que en este caso se trata de módulos intercambiable (SFP+) con puertos LC.

Se utilizaron dos módulos SFP+, uno del lado donde se conectó el Dispositivo de Medición de Taza de Bit en Error (BERT) y del otro lado se conectó un loop de fibra óptica.



Figura 46: Modulo SFP+.

Finalmente, para mantener en rangos medios los niveles de potencia óptica de recepción de los foto detectores de los SFP+, se utilizaron atenuadores ópticos fijos de 5 y 7 dB con conector LC.



Figura 47: Atenuador Óptico Fijo de 7dB.

A continuación se ilustran las potencias ópticas transmitidas y recibidas en distintos puntos de los lados tributarios de la maqueta de prueba:

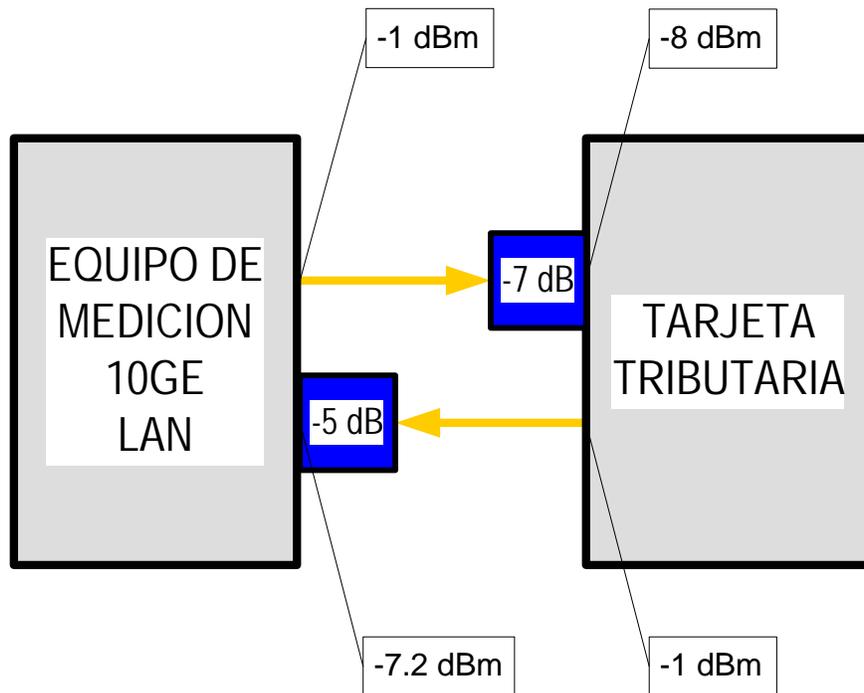


Figura 48: Detalle de conexión entre el Elemento de Red Inferior y el BERT.

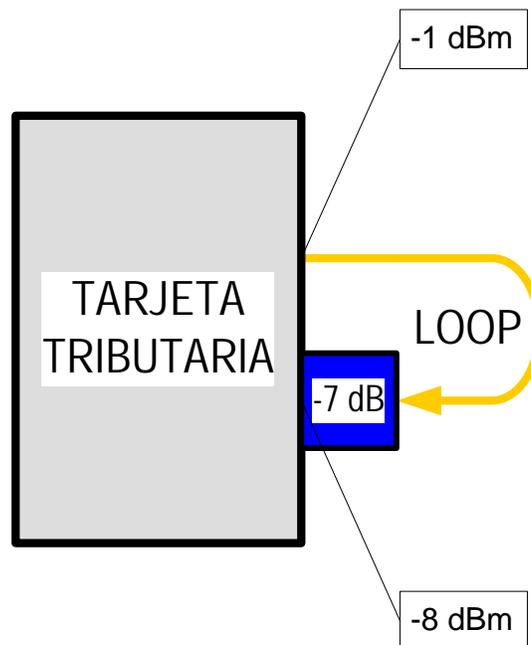


Figura 49: Detalle del loop ubicado en Elemento de Red Superior.

3.2.: Configuración de la red OTN+ASON de pruebas

Una vez ensamblada la red de pruebas, se procede crear sus tarjetas lógicas, el diagrama de flujo virtual y el balance de potencias ópticas con ayuda del software de gestión del fabricante de equipo de transmisión.

❖ Configuración de parámetros básicos ASON:

(AEF7DAD? 7@F7 7E ? 3@63FADA 5A@89GD3DG@ U&A67 ! V A ;67@F;8536AD +' & R@5A 3 cada uno de los dos elementos de red. Es importante cumplir las siguientes reglas al momento de asignar un Node ID a un elemento de red:

- El Node ID no se puede duplicar en el mismo dominio ASON.
- El Node ID no puede estar en el mismo segmento de red que la dirección IP del elemento de red.
- El Node ID, la dirección IP y el NEID de un elemento de red tienen propósitos diferentes y deben ser diferentes entre sí.
- El formato de un Node ID es el mismo que el de una dirección IP.
- El Node ID no puede ser 0.0.0.0, 1.2.3.4 o 255.255.255.255

Una vez configurado el Node ID, es necesario activar la funcionalidad ASON en el elemento de red Superior. Una vez hecho esto, es necesario configurar un Node ID diferente y activar también la funcionalidad ASON en el elemento de red Inferior.

❖ Configuración del dominio ASON:

El sistema de gestión administra una red ASON basado en los dominios ASON. Usualmente los dominios ASON son creados automáticamente.

El siguiente paso consiste en crear un dominio ASON en el cual se agregan los dos elementos de red, uno de ellos debe de elegirse y especificarse como primario. En este caso se elige el elemento de red Superior como primario.

El elemento de red primario es el responsable de comunicar la red ASON con el sistema de gestión de red, asimismo recolecta la información ASON del plano de control y reporta eventos al sistema de gestión de red. Para incrementar la confiabilidad de la gestión del dominio ASON, se puede configurar otro elemento de red como respaldo del primario.

❖ Sincronización de los Enlaces de Control (Control Links):

Una vez que configuramos la comunicación entre el sistema de gestión de red y el elemento de red primario de nuestro dominio ASON, es necesario sincronizar los enlaces de control entre los elemento de red que componen dicho dominio ASON. Esta operación es necesaria para que los elementos de red puedan compartir información ASON entre sí, de tal forma que puedan tener actualizada la topología de red, efectuar conmutaciones o participar en la creación de nuevos servicios. A continuación se muestran los parámetros más importantes de los cuatro Control Links sincronizados:

Name	Alarm Status	Source	Sink	Interface Type	Status	OSPF Protocol Status
Control Link 1	No Alarm	SUPERIOR-Shelf1-Slot10-12SC2-1	INFERIOR-Shelf1-Slot10-12SC2-1	PPP	Up	Enabled
Control Link 2	No Alarm	SUPERIOR-Shelf0-Slot4-54NS4-1	INFERIOR-Shelf0-Slot4-54NS4-1	PPP	Up	Enabled
Control Link 3	No Alarm	SUPERIOR-Shelf0-Slot6-57NS4-1	INFERIOR-Shelf0-Slot6-57NS4-1	PPP	Up	Enabled
Control Link 4	No Alarm	SUPERIOR-Shelf0-Slot25-57NS4-1	INFERIOR-Shelf0-Slot25-57NS4-1	PPP	Up	Enabled

Tabla 4: Enlaces de Control de la Maqueta de Pruebas.

❖ Sincronización de los Enlaces de Ingeniería de Trafico (TE Links):

El sistema de gestión de red solicita los recursos de red a través del elemento de red primario para mantener la información de los enlaces de Ingeniería de Trafico consistentes con la información ASON, es decir, necesitamos sincronizar nuestros TE links con la existencia y disponibilidad de enlaces de red donde están o estarán ubicados los servicios de nuestra red. Es importante mencionar que en este caso, los TE Links son uni-direccionales, por lo tanto se requieren dos TE Links unidireccionales para tener un LSP bi-direccional A continuación se muestra una tabla de los parámetros más importantes de los TE links sincronizados:

Source	SUPERIOR-Shelf0-Slot25-57NS4-1	SUPERIOR-Shelf0-Slot6-57NS4-1	SUPERIOR-Shelf0-Slot4-54NS4-1	INFERIOR-Shelf0-Slot25-57NS4-1	INFERIOR-Shelf0-Slot6-57NS4-1	INFERIOR-Shelf0-Slot4-54NS4-1
Sink	INFERIOR-Shelf0-Slot25-57NS4-1	INFERIOR-Shelf0-Slot6-57NS4-1	INFERIOR-Shelf0-Slot4-54NS4-1	SUPERIOR-Shelf0-Slot25-57NS4-1	SUPERIOR-Shelf0-Slot6-57NS4-1	SUPERIOR-Shelf0-Slot4-54NS4-1
Link Signal Type	OTU4	OTU4	OTU4	OTU4	OTU4	OTU4
Payload Type	ODU0 / ODU1 / ODU2 / ODU3 / ODU4 / ODUflex					
Alarm Status	No Alarm					
Max. Path Count	ODU0:80 / ODU1:40 / ODU2:10 / ODU3:2 / ODU4:1 / ODUflex:80					
Available Path Count	ODU0:80 / ODU1:40 / ODU2:10 / ODU3:2 / ODU4:1 / ODUflex:80					
Resource Usage (%)	ODU0:0.0% / ODU1:0.0% / ODU2:0.0% / ODU3:0.0% / ODU4:0.0% / ODUflex:0.0%					
Distance(km)	0	0	0	0	0	0
Custom Cost	0	0	0	0	0	0
Link Status	Up	Up	Up	Up	Up	Up
Domain Name	Test Domain 1					
Extend Type	Automatically Discovered					

Tabla 5: Enlaces de Ingeniería de Trafico de la Maqueta de Pruebas.

3.3.: Configuración de servicios OTN+ASON en maqueta de pruebas

Una vez que configuramos los parámetros fundamentales de la red ASON, ya podemos comenzar a crear servicios punto a punto con inteligencia o ASON Trails. A continuación se describen los parámetros más importantes de configuración de los servicios que se probaran en el siguiente capítulo.

Tipo de Servicio	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Diamond	Diamond Con Re-Enrutamiento Tras Falla de 1 LSP	Diamond Con Re-Enrutamiento Tras Falla de 2 LSP	Diamond Sin Re-Enrutamiento
Silver	Silver Revertivo	Silver No-Revertivo	Silver No-Revertivo Con LSPs de Distinto Costo
Cooper	Cooper No-Protegido		

Tabla 6: Escenarios configurados en la Maqueta de Pruebas.

❖ Diamond Escenario 1

PARAMETER NAME	PARAMETER VALUE
Name	ASON_Trail_Rerouting
Type	OTN ASON Trail
Class	Diamond
Source Port	SUPERIOR-Shelf0-Slot21-54TTX-3
Sink Port	INFERIOR-Shelf0-Slot21-54TTX-3
Working TE Link	SUPERIOR-0-4 <-> INFERIOR-0-4
Protection TE Link	SUPERIOR-0-6 <-> INFERIOR-0-6
Level	ODU2
Activation Status	Active
Service Type	10Gbps Ethernet LAN
SNCP Type	SNCP/N
Reroute Lockout	Unlocked
Revertive Mode	Revertive
WTR Time (s)	600
Trigger Condition for Re-Routing	Reroute when both trail fail
Rerouting Triggered by SD	No
Switching Triggered by SD	No

Tabla 7: Parámetros de configuración del Escenario Diamond 1.

❖ Diamond Escenario 2

PARAMETER NAME	PARAMETER VALUE
Name	ASON_TrailPermanent
Type	OTN ASON Trail
Class	Diamond
Source Port	SUPERIOR-Shelf0-Slot21-54TTX-3
Sink Port	INFERIOR-Shelf0-Slot21-54TTX-3
Working TE Link	SUPERIOR-0-4 <-> INFERIOR-0-4
Protection TE Link	SUPERIOR-0-6 <-> INFERIOR-0-6
Level	ODU2
Activation Status	Active
Service Type	10Gbps LAN
SNCP Type	SNCP/N
Reroute Lockout	Unlocked
Revertive Mode	Revertive
WTR Time (s)	600
Trigger Condition for Re-Routing	Reroute when one trail fails
Rerouting Triggered by SD	No
Switching Triggered by SD	No

Tabla 8: Parámetros de configuración del Escenario Diamond 2.

❖ Diamond Escenario 3

PARAMETER NAME	PARAMETER VALUE
Name	ASON_Trail_NonRerouting
Type	OTN ASON Trail
Class	Diamond
Source Port	SUPERIOR-Shelf0-Slot21-54TTX-3
Sink Port	INFERIOR-Shelf0-Slot21-54TTX-3
Working TE Link	SUPERIOR-0-4 <-> INFERIOR-0-4
Protection TE Link	SUPERIOR-0-6 <-> INFERIOR-0-6
Level	ODU2
Activation Status	Active
Service Type	10Gbps LAN
SNCP Type	SNCP/N
Reroute Lockout	Unlocked
Revertive Mode	Revertive
WTR Time (s)	600
Trigger Condition for Re-Routing	Never reroute
Rerouting Triggered by SD	No
Switching Triggered by SD	No

Tabla 9: Parámetros de configuración del Escenario Diamond 3.

❖ Silver Escenario 1

PARAMETER NAME	PARAMETER VALUE
Name	ASON_Trail_Silver_Revertivo
Type	OTN ASON Trail
Class	Silver
Source Port	SUPERIOR-Shelf0-Slot21-54TTX-3
Sink Port	INFERIOR-Shelf0-Slot21-54TTX-3
Working TE Link	SUPERIOR-0-4 <-> INFERIOR-0-4
Protection TE Link	N/A
Level	ODU2
Activation Status	Active
Service Type	10Gbps Ethernet LAN
SNCP Type	N/A
Revertive Mode	Revertive
WTR Time (s)	600
Trigger Condition for Re-Routing	N/A
Rerouting Triggered by SD	No
Switching Triggered by SD	N/A

Tabla 10: Parámetros de configuración del Escenario Silver 1.

❖ Silver Escenario 2

PARAMETER NAME	PARAMETER VALUE
Name	ASON_Trail_Silver_NoRevertivo
Type	OTN ASON Trail
Class	Silver
Source Port	SUPERIOR-Shelf0-Slot21-54TTX-3
Sink Port	INFERIOR-Shelf0-Slot21-54TTX-3
Working TE Link	SUPERIOR-0-4 <-> INFERIOR-0-4
Protection TE Link	N/A
Level	ODU2
Activation Status	Active
Service Type	10Gbps Ethernet LAN
SNCP Type	N/A
Revertive Mode	No-Revertive
WTR Time (s)	N/A
Trigger Condition for Re-Routing	N/A
Rerouting Triggered by SD	No
Switching Triggered by SD	N/A

Tabla 11: Parámetros de configuración del Escenario Silver 2.

❖ Silver Escenario 3

PARAMETER NAME	PARAMETER VALUE
Name	ASON_Trail_Silver_DiferenteCosto
Type	OTN ASON Trail
Class	Silver
Source Port	SUPERIOR-Shelf0-Slot21-54TTX-3
Sink Port	INFERIOR-Shelf0-Slot21-54TTX-3
Working TE Link	SUPERIOR-0-4 <-> INFERIOR-0-4
Protection TE Link	N/A
Level	ODU2
Activation Status	Active
Service Type	10Gbps Ethernet LAN
SNCP Type	N/A
Revertive Mode	No-Revertive
WTR Time (s)	N/A
Trigger Condition for Re-Routing	N/A
Rerouting Triggered by SD	No
Switching Triggered by SD	N/A

Tabla 12: Parámetros de configuración del Escenario Silver 3.

En este escenario se configuro un costo diferente a los TE links de acuerdo a la siguiente tabla:

Ruta	Costo
4	00
6	80
25	20

Tabla 13: Costo de los TE Links del Escenario Silver 3.

❖ Cooper Escenario 1

PARAMETER NAME	PARAMETER VALUE
Name	ASON_Trail_Silver_Cooper
Type	OTN ASON Trail
Class	Cooper
Source Port	SUPERIOR-Shelf0-Slot21-54TTX-3
Sink Port	INFERIOR-Shelf0-Slot21-54TTX-3
Working TE Link	SUPERIOR-0-4 <-> INFERIOR-0-4
Protection TE Link	N/A
Level	ODU2
Activation Status	Active
Service Type	10Gbps Ethernet LAN
SNCP Type	N/A
Revertive Mode	N/A
WTR Time (s)	N/A
Trigger Condition for Re-Routing	N/A
Rerouting Triggered by SD	N/A
Switching Triggered by SD	N/A

Tabla 14: Parámetros de configuración del Escenario Cooper.

CAPÍTULO 4: PROTOCOLO DE PRUEBAS

En este capítulo se documentan las pruebas realizadas con la maqueta descrita en el capítulo anterior. También se presenta el comportamiento de los tipos de servicios probados modificando parámetros clave de cada uno de ellos de acuerdo a los siguientes escenarios:

Tipo de Servicio	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Diamond	Diamond Con Re-Enrutamiento Tras Falla de 1 LSP	Diamond Con Re-Enrutamiento Tras Falla de 2 LSP	Diamond Sin Re-Enrutamiento
Silver	Silver Revertivo	Silver No-Revertivo	Silver No-Revertivo Con LSPs de Distinto Costo
Cooper	Cooper No-Protegido		

Tabla 15: Escenarios de prueba.

4.1.: Pruebas con servicio Diamond

4.1.1.: Escenario 1: Servicio Diamond Con Re-Enrutamiento Tras Falla de 1 LSP

En este escenario vemos como el servicio Diamond presenta una ruta de trabajo y una de respaldo desde el momento de su estado inicial.

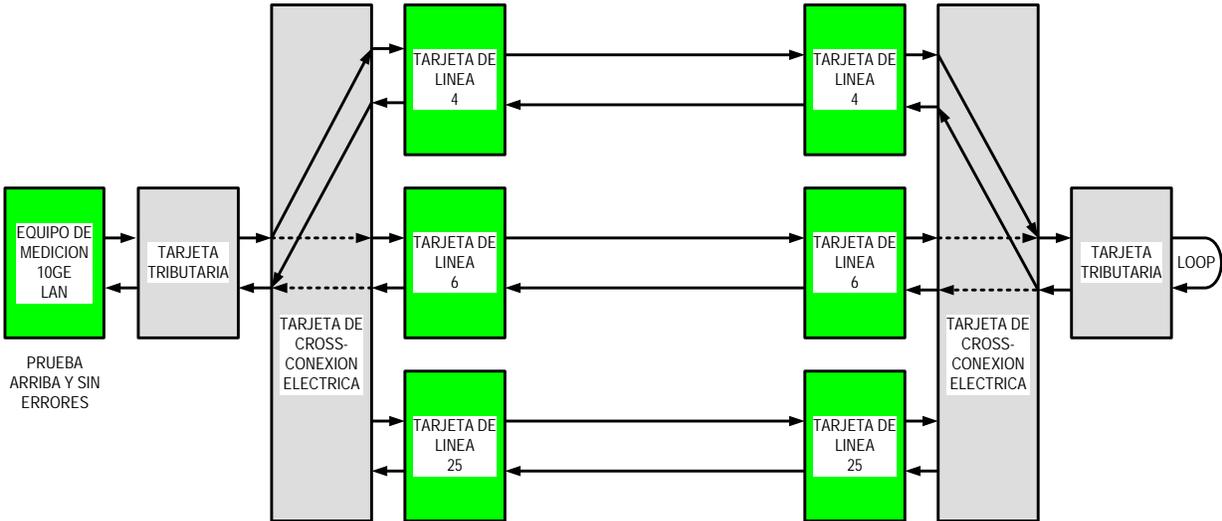


Figura 50: Estado inicial del escenario Diamond 1.

Una vez que desconectamos físicamente la primera ruta, el servicio conmuta automáticamente a la ruta de respaldo mientras el sistema busca una ruta alternativa activa. Es decir, se inicia una conmutación y un re-enrutamiento en el mismo momento de detección de la falla en la ruta de trabajo original. El tiempo de conmutación es $\leq 50ms$, tras lo cual el servicio se mantiene funcionando.

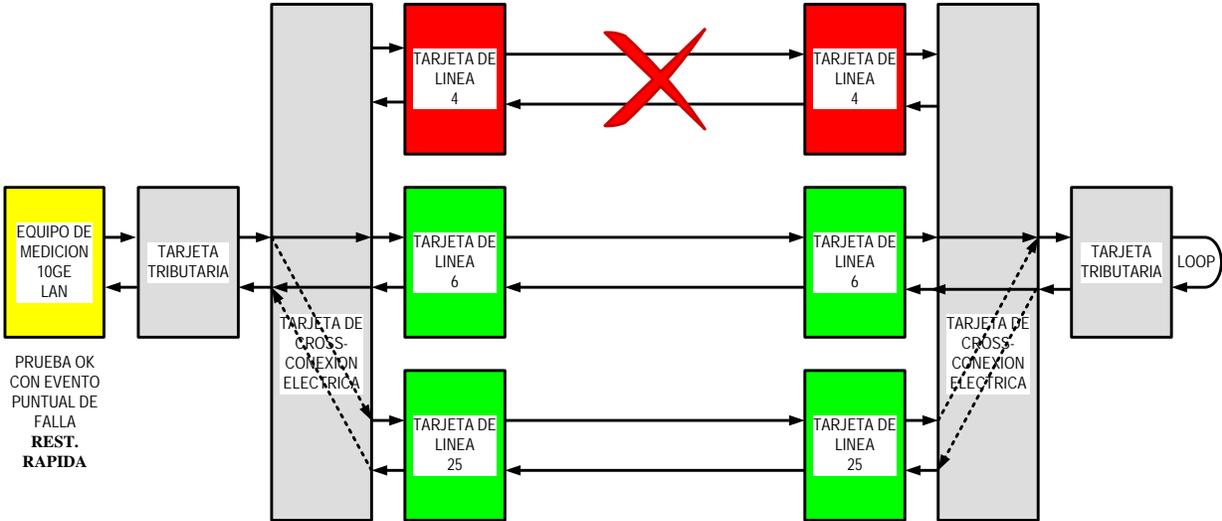


Figura 51: Escenario Diamond 1 con el primer LSP interrumpido.

Una vez que desconectamos físicamente la segunda ruta, el servicio conmuta automáticamente a la nueva ruta de respaldo mientras el sistema busca una nueva ruta alternativa activa, que en este caso no existe. El servicio entonces conmuta a la tercera ruta. El tiempo de conmutación es $\leq 50\text{ms}$, tras lo cual el servicio se mantiene funcionando.

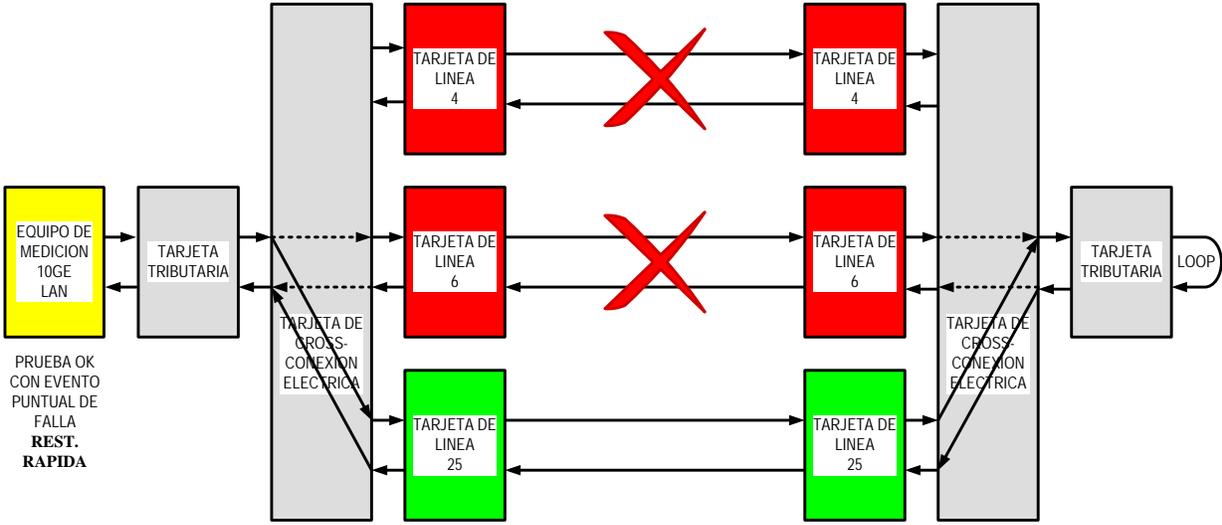


Figura 52: Escenario Diamond 1 con dos LSPs interrumpidos.

Una vez que desconectamos físicamente la tercera ruta, el servicio no tiene rutas activas a donde conmutar, por lo cual falla y se mantiene fallido.

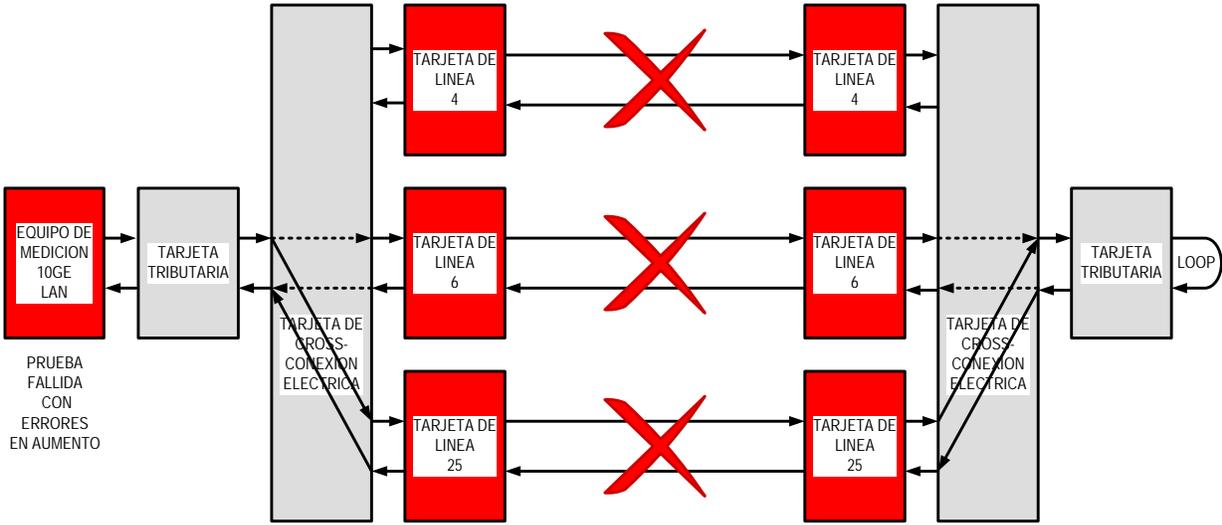


Figura 53: Escenario Diamond 1 con todos los LSPs interrumpidos.

4.1.2.: Escenario 2: Servicio Diamond Con Re-Enrutamiento Tras Falla de 2 LSP

En este escenario vemos como el servicio Diamond presenta una ruta de trabajo y una de respaldo desde el momento de su estado inicial.

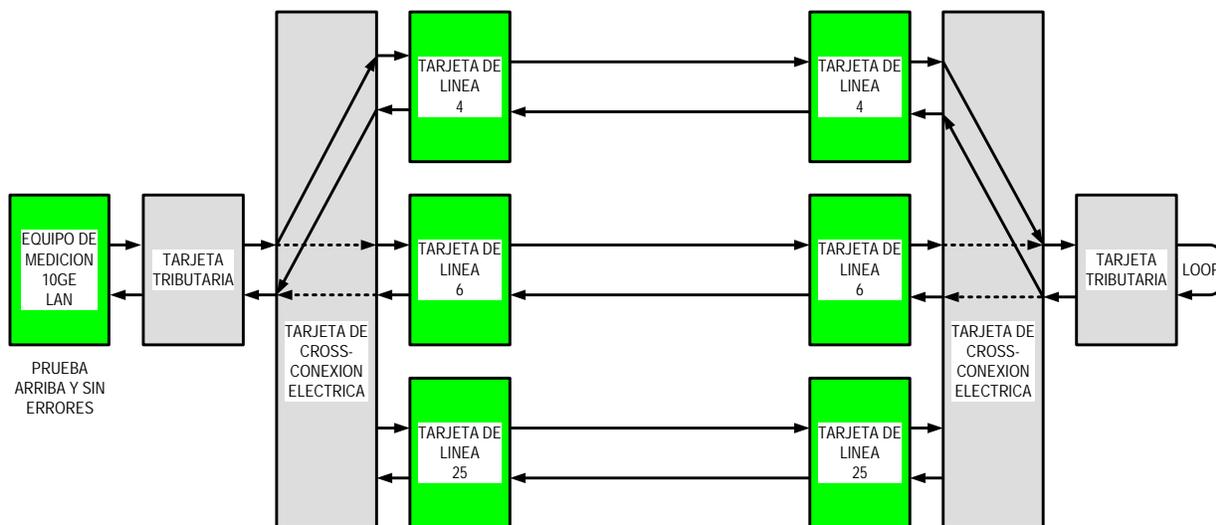


Figura 54: Estado inicial del escenario Diamond 2.

Una vez que desconectamos físicamente la primera ruta, el servicio conmuta automáticamente a la ruta de respaldo. El sistema no busca una ruta alternativa aun. El tiempo de conmutación es $\leq 50ms$, tras lo cual el servicio se mantiene funcionando.

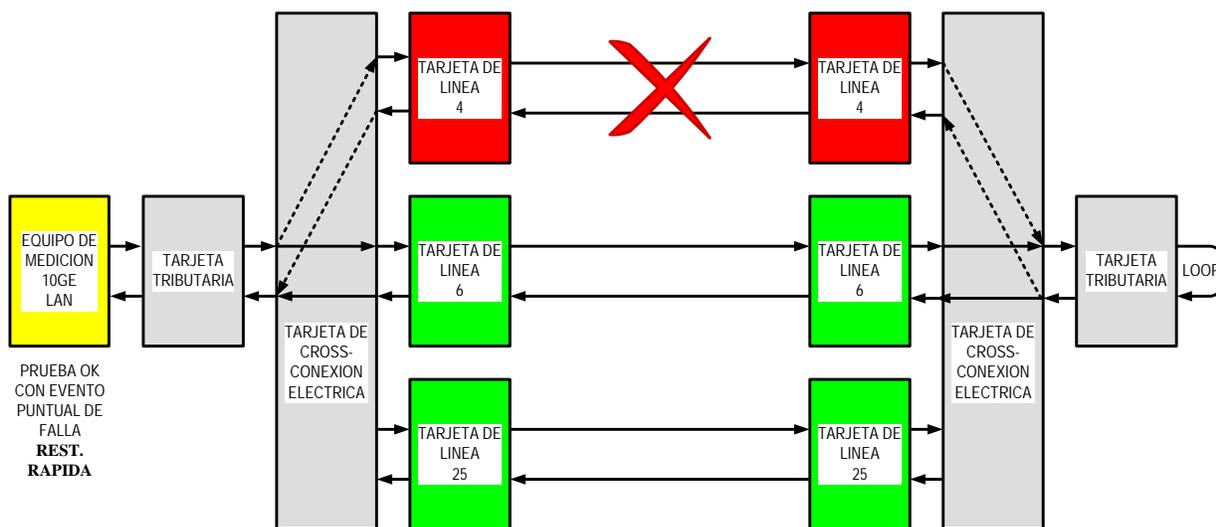


Figura 55: Escenario Diamond 2 con el primer LSP interrumpido.

Una vez que desconectamos físicamente la segunda ruta, el sistema busca una ruta alternativa activa, que en este caso es la tercera. Una vez encontrada dicha ruta el servicio es conmutado a la misma. Es decir, el sistema realiza un Re-Enrutamiento solo después de la falla de las dos primeras rutas. El tiempo de conmutación es > 1s, puesto que en este escenario, la conmutación se realiza después del re-enrutamiento.

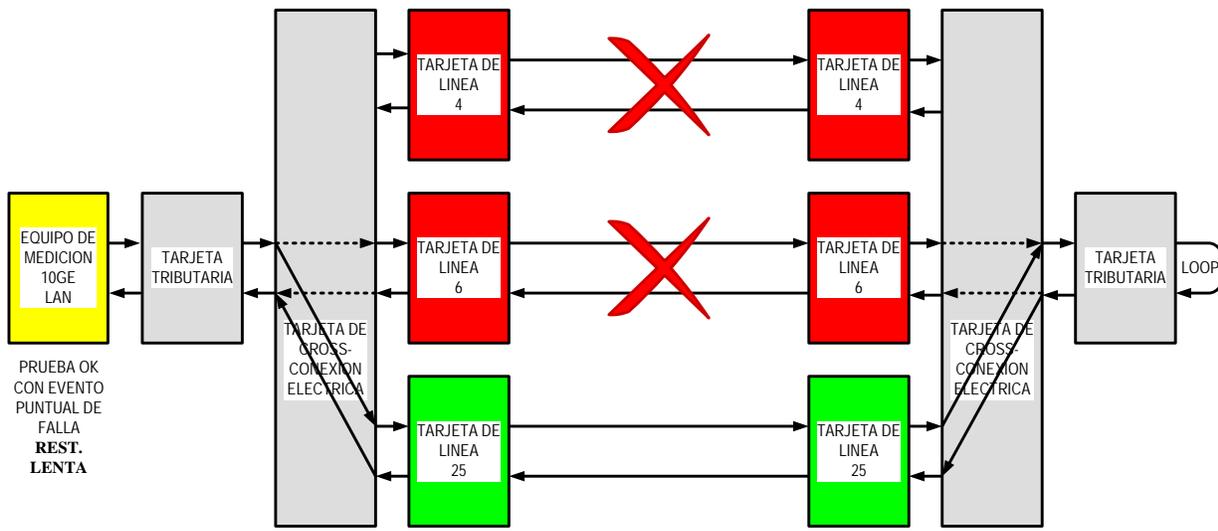


Figura 56: Escenario Diamond 2 con dos LSPs interrumpidos.

Una vez que desconectamos físicamente la tercera ruta, el sistema no tiene recursos donde hacer un Re-Enrutamiento y el servicio no tiene rutas activas a donde conmutar, por lo cual falla y se mantiene fallido.

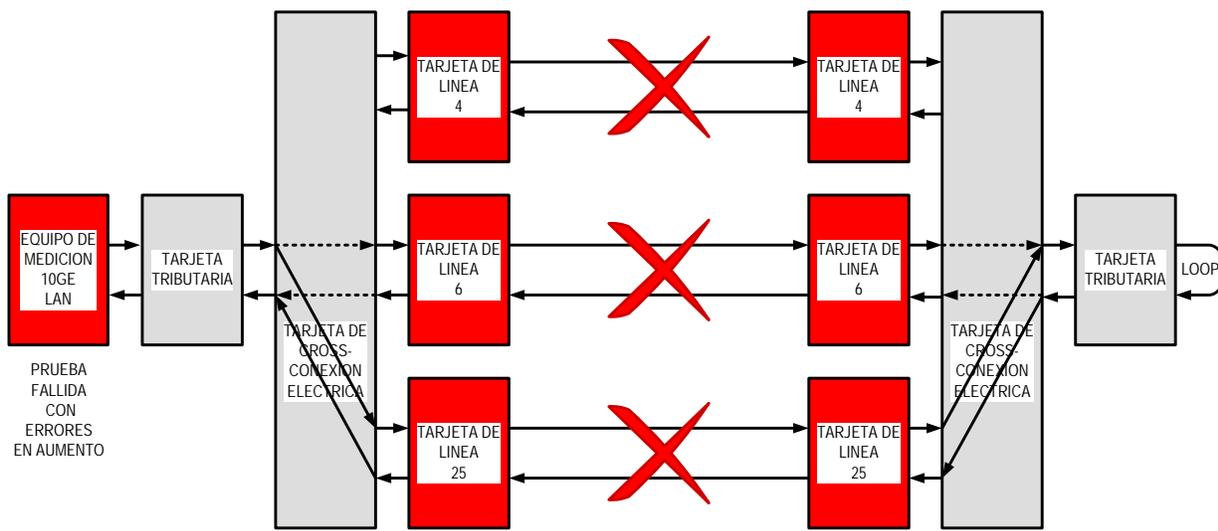


Figura 57: Escenario Diamond 2 con todos los LSPs interrumpidos.

4.1.3.: Escenario 3: Servicio Diamond Sin Re-Enrutamiento

En este escenario vemos como el servicio Diamond presenta una ruta de trabajo y una de respaldo desde el momento de su estado inicial.

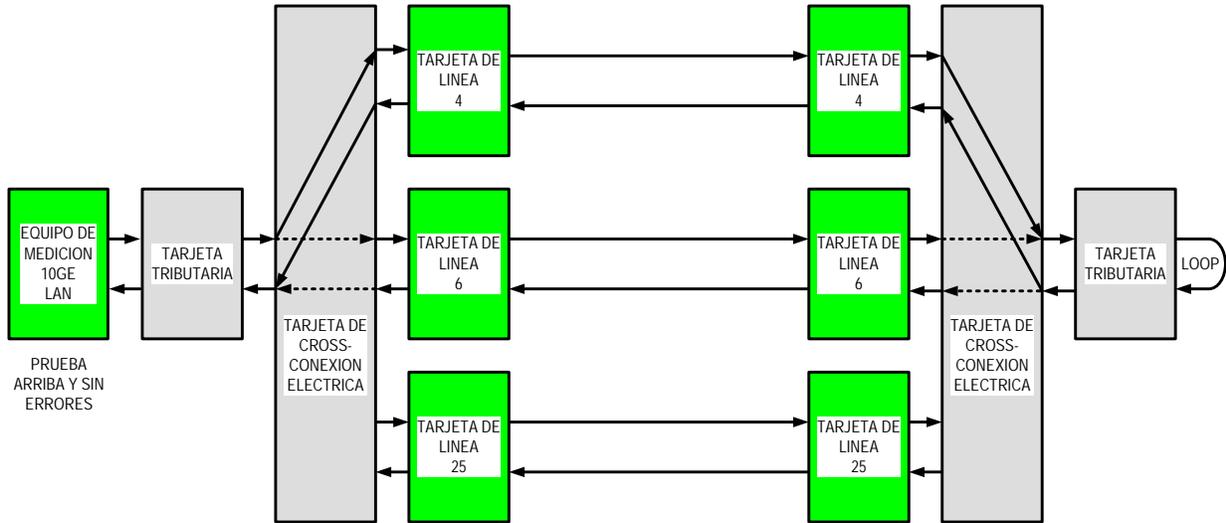


Figura 58: Estado inicial del escenario Diamond 3.

Una vez que desconectamos físicamente la primera ruta, el servicio conmuta automáticamente a la ruta de respaldo. El sistema no busca una ruta alternativa. El tiempo de conmutación es $\leq 50\text{ms}$, tras lo cual el servicio se mantiene funcionando.

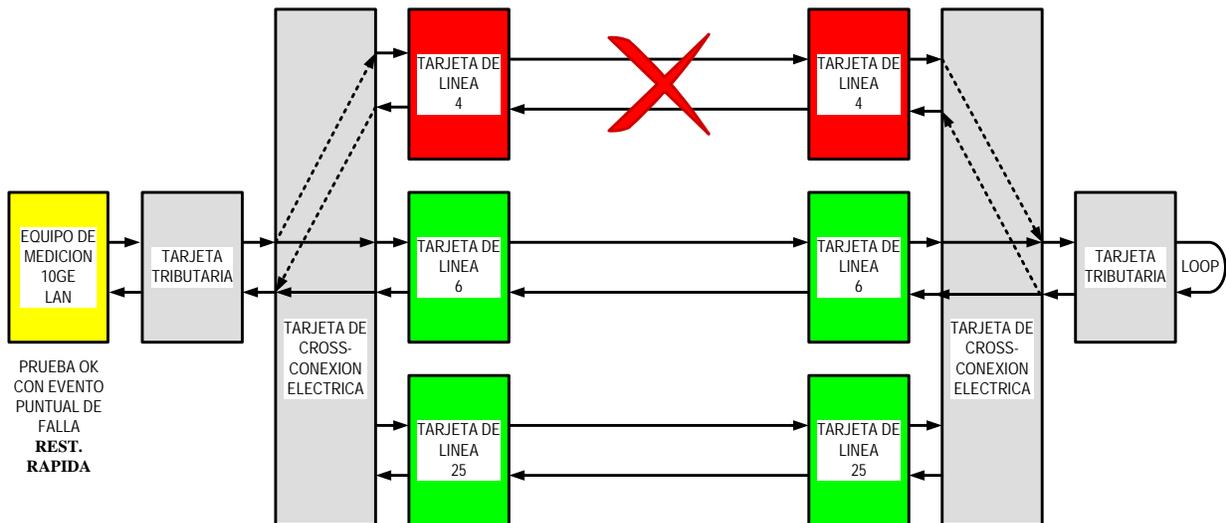
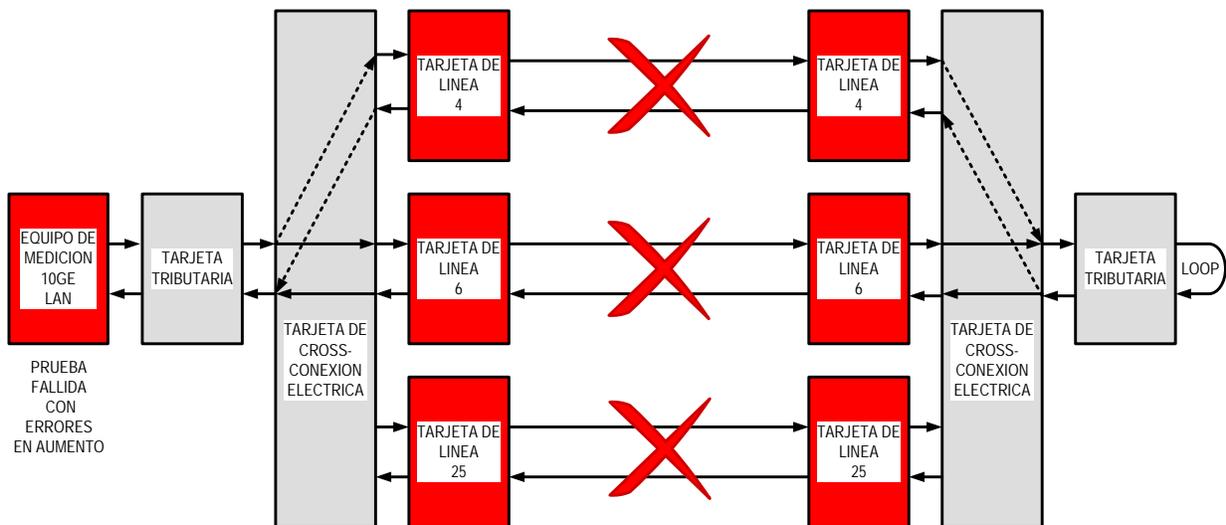


Figura 59: Escenario Diamond 3 con el primer LSP interrumpido.

Una vez que desconectamos físicamente la segunda ruta y pese a que hay recursos disponibles, el sistema no busca una ruta alternativa y el servicio no conmuta, fallando y manteniéndose fallido.



Una vez que desconectamos físicamente la tercera ruta, el sistema sigue sin hacer ni re-enrutamiento ni conmutación, por lo cual el servicio continúa fallido.



4.2.: Pruebas con servicio Silver

4.2.1.: Escenario 1: Silver Revertivo

En este escenario vemos como el servicio Silver presenta solamente una ruta de trabajo en su estado inicial y ninguna ruta de respaldo.

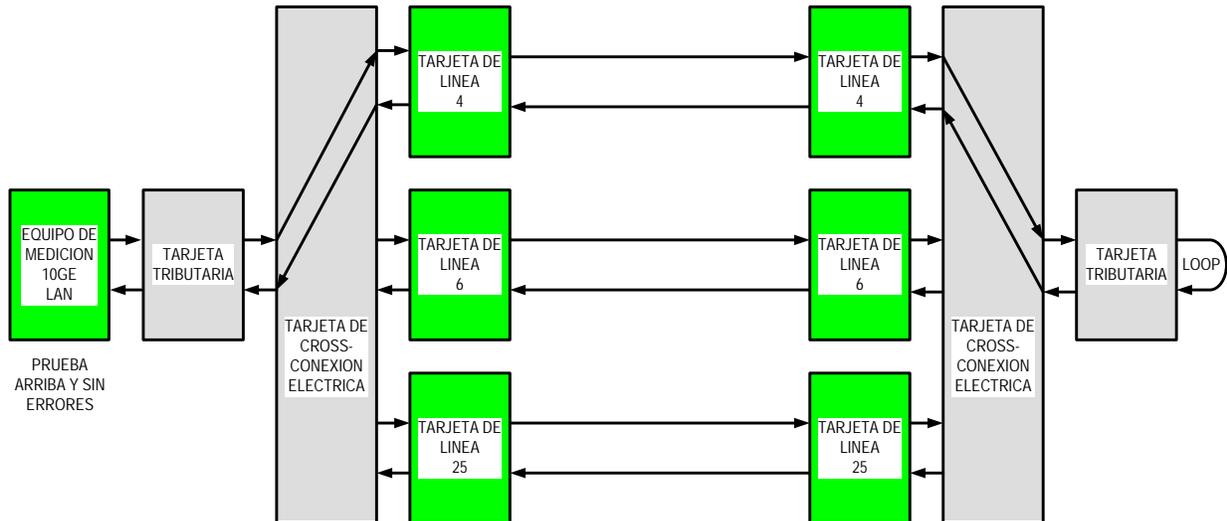


Figura 62: Estado inicial del escenario Silver 1.

Una vez que desconectamos la primera ruta, el sistema busca una ruta de alternativa activa. Se encuentra la segunda ruta tras lo cual el servicio es conmutado a la misma. El tiempo de conmutación es $> 1s$, puesto que en este escenario, la conmutación se realiza después del re-enrutamiento. La ruta de trabajo original no es eliminada

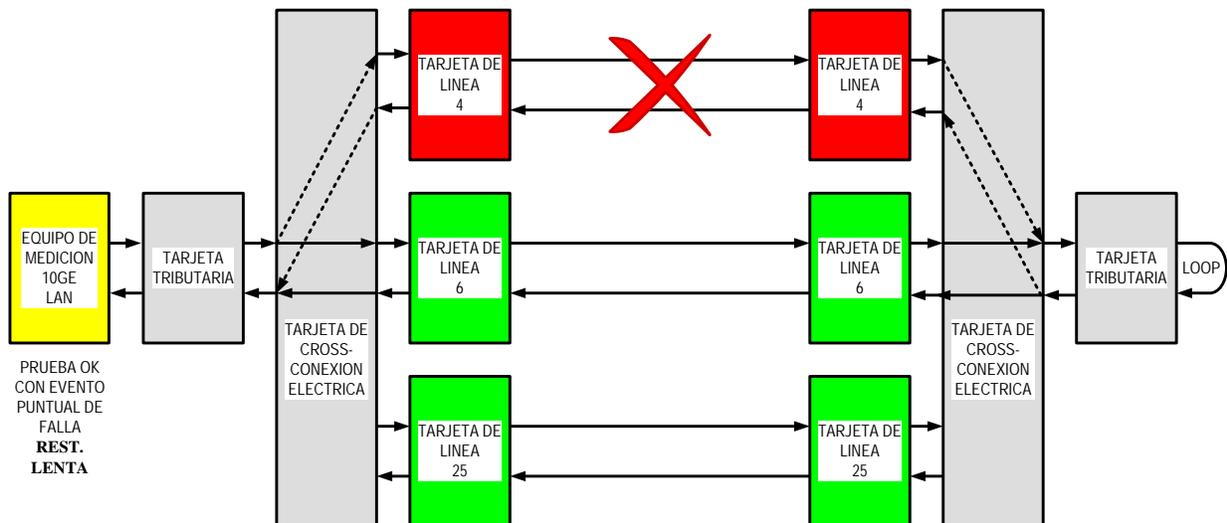


Figura 63: Escenario Silver 1 con el primer LSP interrumpido.

Una vez que desconectamos la segunda ruta, el sistema busca una ruta de alternativa activa, que en este caso es la tercera. Una vez encontrada dicha ruta el servicio es conmutado a la misma. El tiempo de conmutación es $> 1s$, puesto que en este escenario, la conmutación se realiza después del re-enrutamiento. La ruta de trabajo anterior no es eliminada.

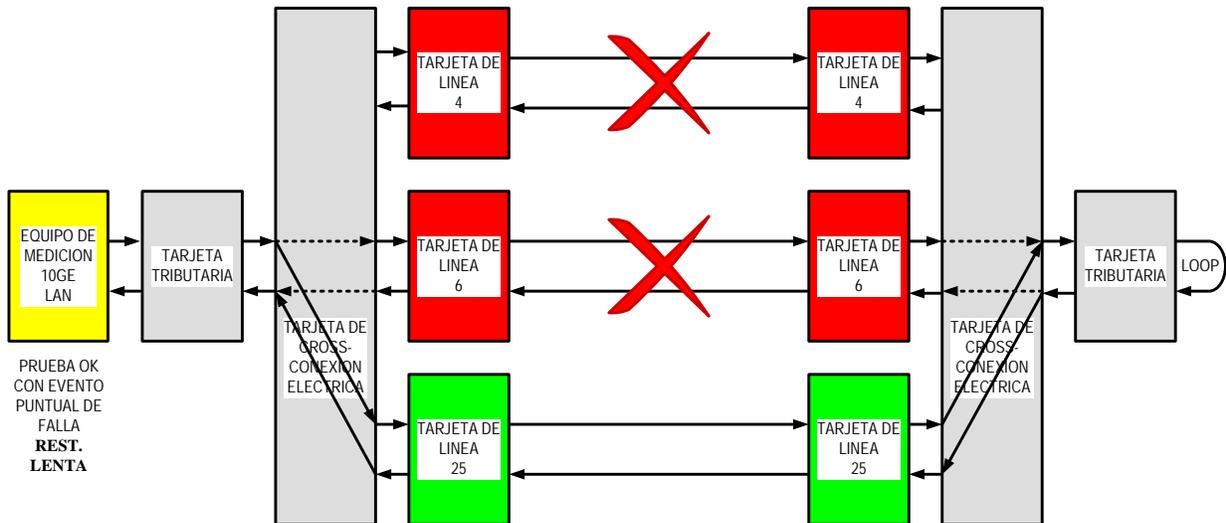


Figura 64: Escenario Silver 1 con los dos primeros LSPs interrumpidos.

Una vez que desconectamos físicamente la tercera ruta, el sistema no tiene recursos suficientes donde construir una nueva ruta de trabajo por lo que el sistema no conmuta, no realiza re-enrutamiento y el servicio falla.

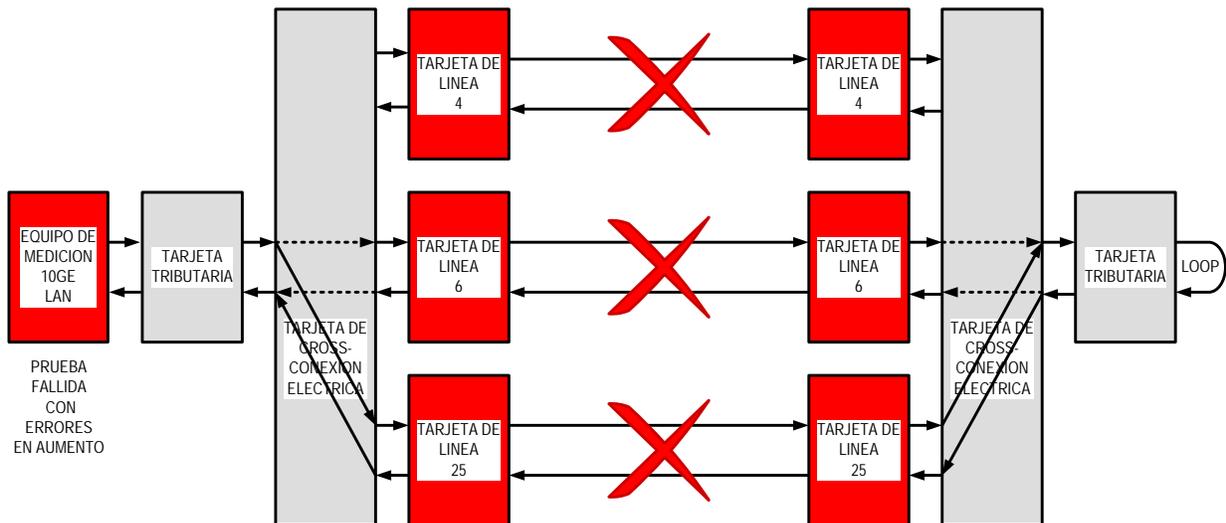


Figura 65: Escenario Silver 1 con todos los LSPs interrumpidos.

4.2.2.: Escenario 2: Silver No-Revertivo

En este escenario vemos como el servicio Silver presenta solamente una ruta de trabajo en su estado inicial y ninguna ruta de respaldo.

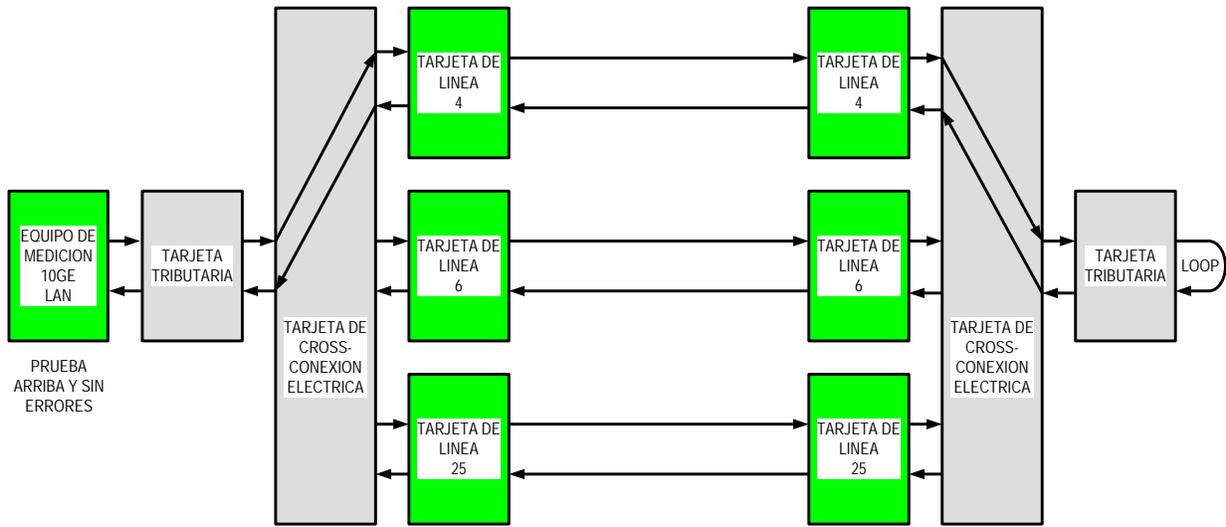


Figura 66: Estado inicial del Escenario Silver 2.

Una vez que desconectamos la primera ruta, el sistema busca una ruta de alternativa activa. Se encuentra la segunda ruta tras lo cual el servicio es conmutado a la misma. El tiempo de conmutación es > 1s, puesto que en este escenario, la conmutación se realiza después del re-enrutamiento. La ruta de trabajo original es eliminada.

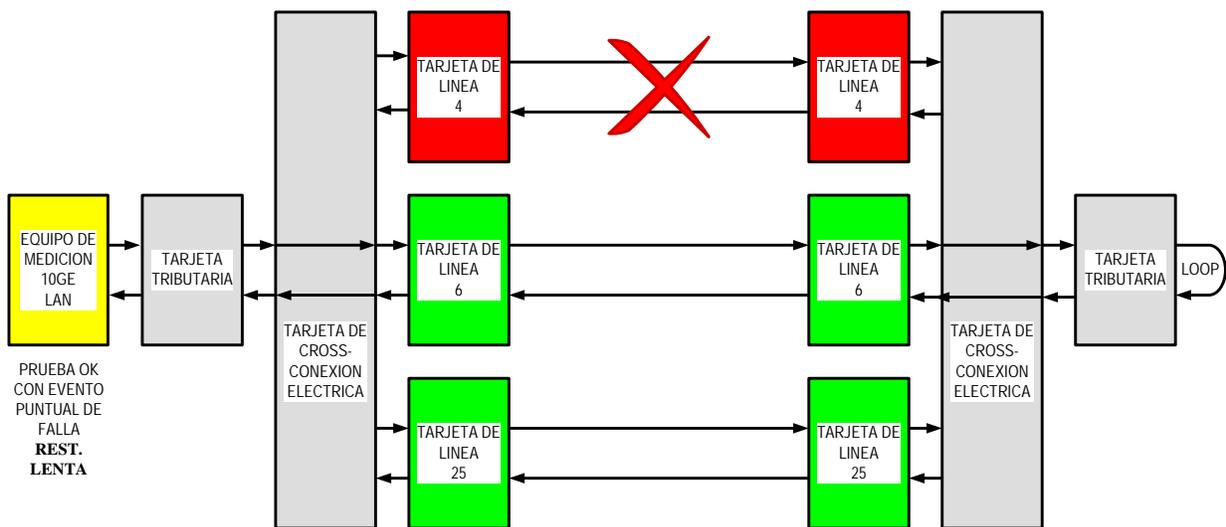


Figura 67: Escenario Silver 2 con el primer LSP interrumpido.

Una vez que desconectamos la segunda ruta, el sistema busca una ruta alternativa activa. Se encuentra la tercera ruta tras lo cual el servicio es conmutado a la misma. El tiempo de conmutación es $> 1s$, puesto que en este escenario, la conmutación se realiza después del re-enrutamiento. La ruta de trabajo anterior es eliminada.

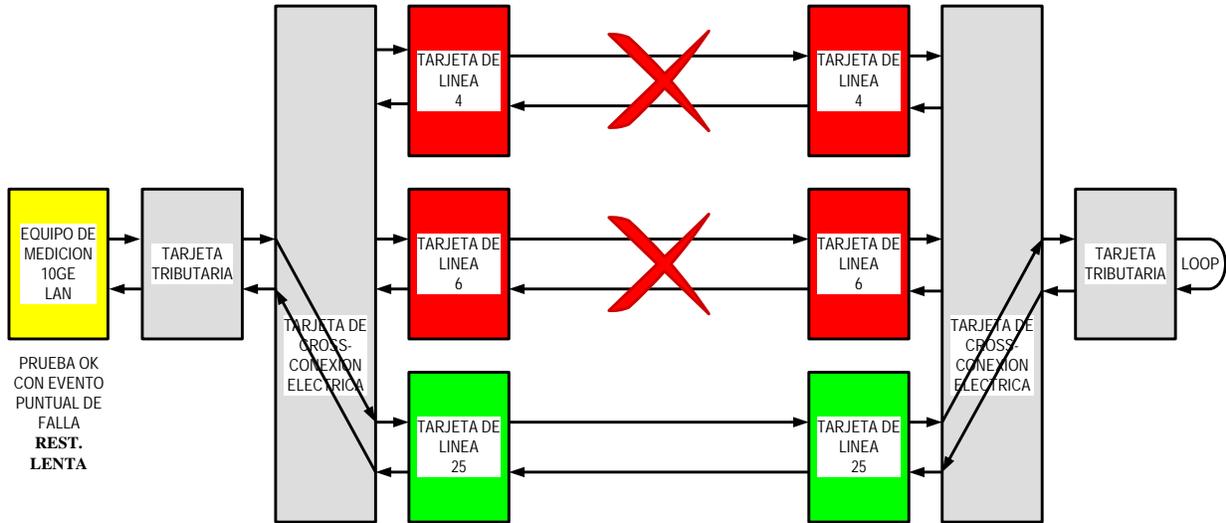


Figura 68: Escenario Silver 2 con los primeros dos LSPs interrumpidos.

Una vez que desconectamos la tercera ruta, el sistema no tiene recursos suficientes donde encontrar una nueva ruta activa y el servicio falla.

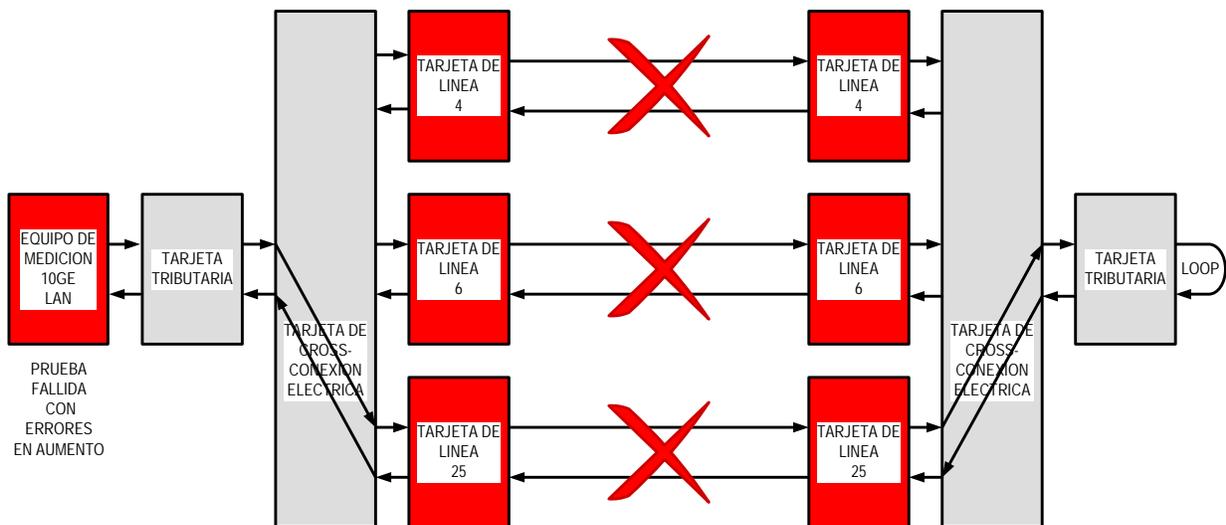


Figura 69: Escenario Silver 2 con todos los LSPs interrumpidos.

4.2.3.: Escenario 3: Silver No-Revertivo Con LSPs de Distinto Costo

En ASON, los TE links pueden ser configurados con distintos costos, en un re-enrutamiento con varios TE Links disponibles, un TE link con un menor costo tiene prioridad.

En los escenarios Silver anteriores, al tener todas las rutas el mismo costo, el sistema elige las nuevas rutas respecto al orden ascendente de acuerdo a la posición de las tarjetas de línea de las mismas durante el re-enrutamiento.

En este escenario se configuro un costo diferente a la segunda y tercera ruta de acuerdo a la siguiente tabla:

Ruta	Costo
4	00
6	80
25	20

Tabla 16: Costo de los TE Links utilizados en el escenario Silver 3.

En el estado inicial, el servicio es configurado sobre la primera ruta, en este momento todavía no se hace ningún re-enrutamiento del servicio original.

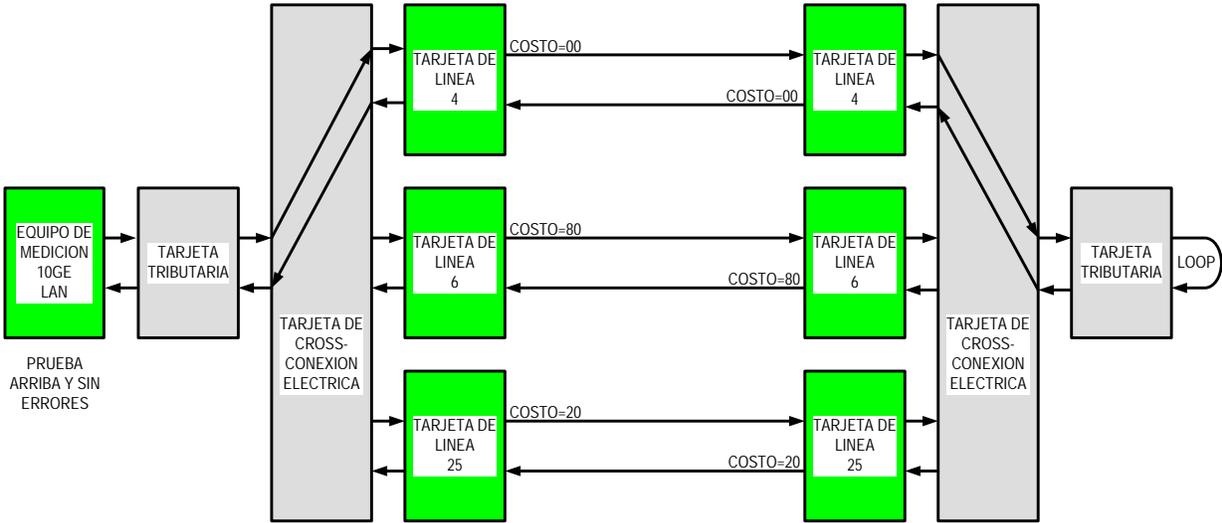


Figura 70: Estado inicial del Escenario Silver 3.

Una vez que desconectamos la primera ruta, el sistema busca una ruta de alternativa activa. De entre las dos rutas activas disponibles, el sistema elige la que tiene menor costo, en este caso la tercera. El tiempo de conmutación es $> 1s$, puesto que la conmutación del servicio se realiza después del re-enrutamiento. La ruta de trabajo original es eliminada.

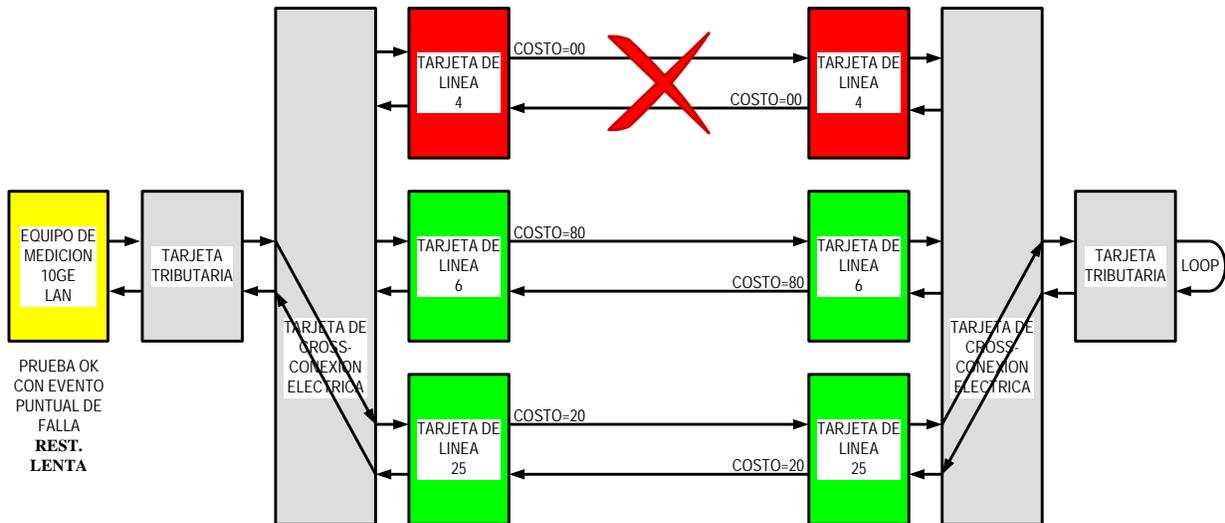


Figura 71: Escenario Silver 3 con el primer LSP interrumpido.

Una vez que desconectamos la segunda ruta, el sistema busca una ruta de alternativa activa. El sistema elige la única disponible, es decir la segunda. El tiempo de conmutación es $> 1s$, puesto que la conmutación del servicio se realiza después del re-enrutamiento. La ruta de trabajo anterior es eliminada.

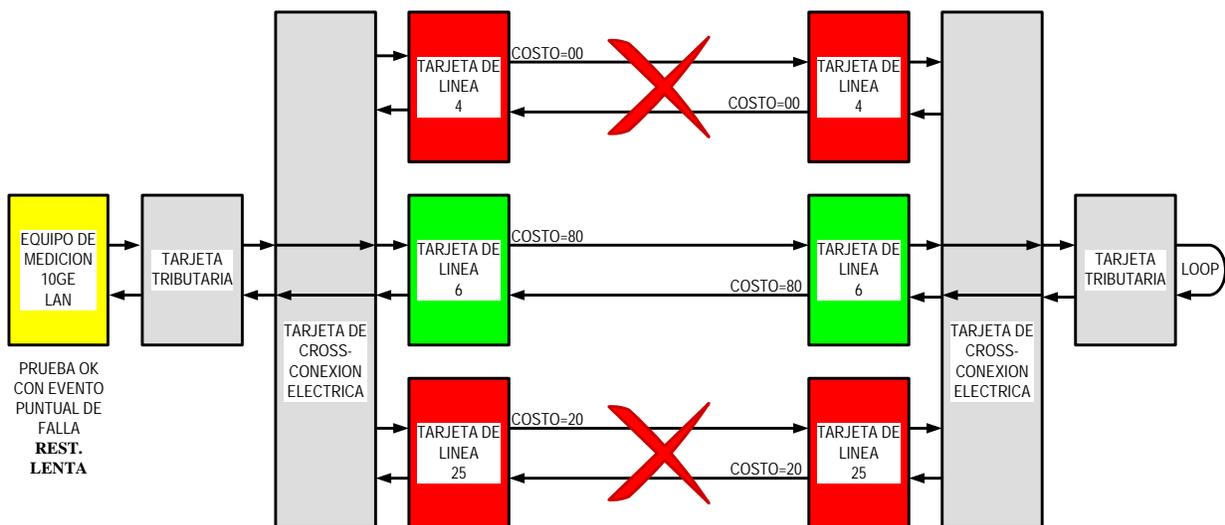


Figura 72: Escenario Silver 3 con el tercer LSP interrumpido.

Una vez que desconectamos la segunda ruta, el sistema no tiene recursos suficientes donde encontrar una nueva ruta activa y el servicio falla.

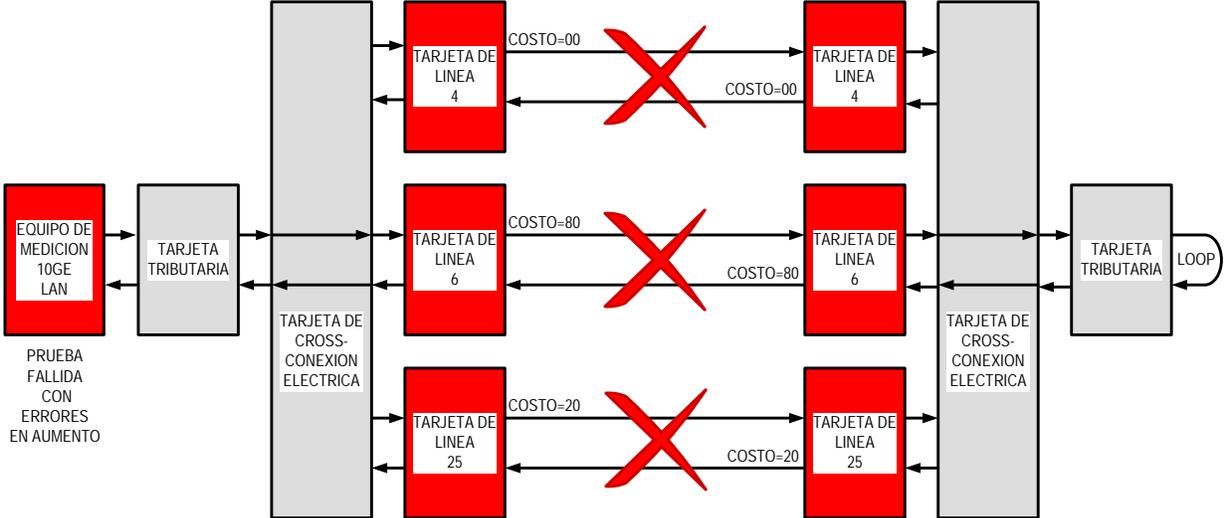


Figura 73: Escenario Silver 3 con todos los LSPs interrumpidos.

4.3.: Pruebas con servicio Cooper

4.3.1.: Escenario 1: Cooper No-Protegido

El servicio Cooper carece de protección alguna, por lo que el servicio se mantiene configurado por la misma ruta que en su estado inicial.

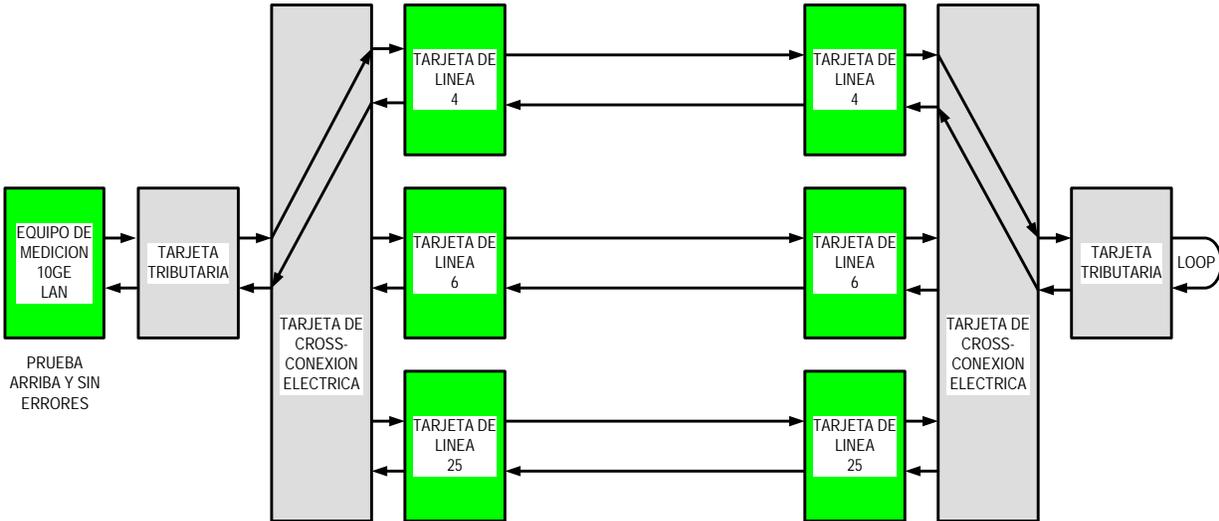


Figura 74: Estado inicial del escenario Cooper.

Una vez que desconectamos la primera ruta, pese a que hay dos rutas activas disponibles, el sistema no realiza ni una conmutación ni un re-enrutamiento, en consecuencia el servicio falla y se mantiene fallido.

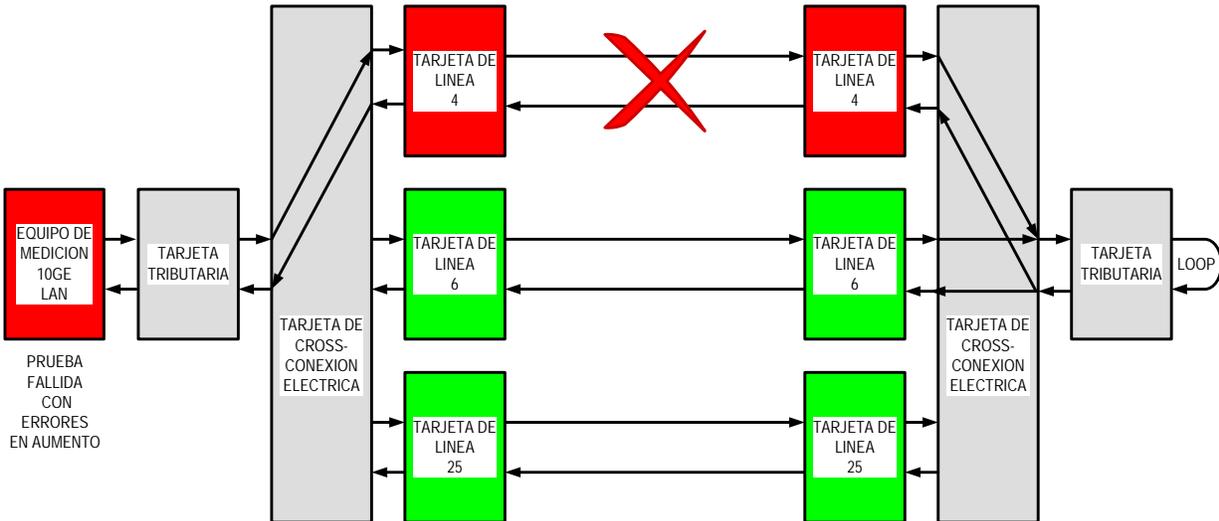


Figura 75: Escenario Cooper con el primer LSP interrumpido.

Una vez que desconectamos la segunda ruta, pese a que hay una ruta activa disponible, el sistema no realiza ni una conmutación ni un re-enrutamiento, el servicio permanece interrumpido.



Figura 76: Escenario Cooper con dos LSPs interrumpidos.

Una vez que desconectamos la tercera ruta, el sistema no realiza ni una conmutación ni un re-enrutamiento, el servicio permanece interrumpido.

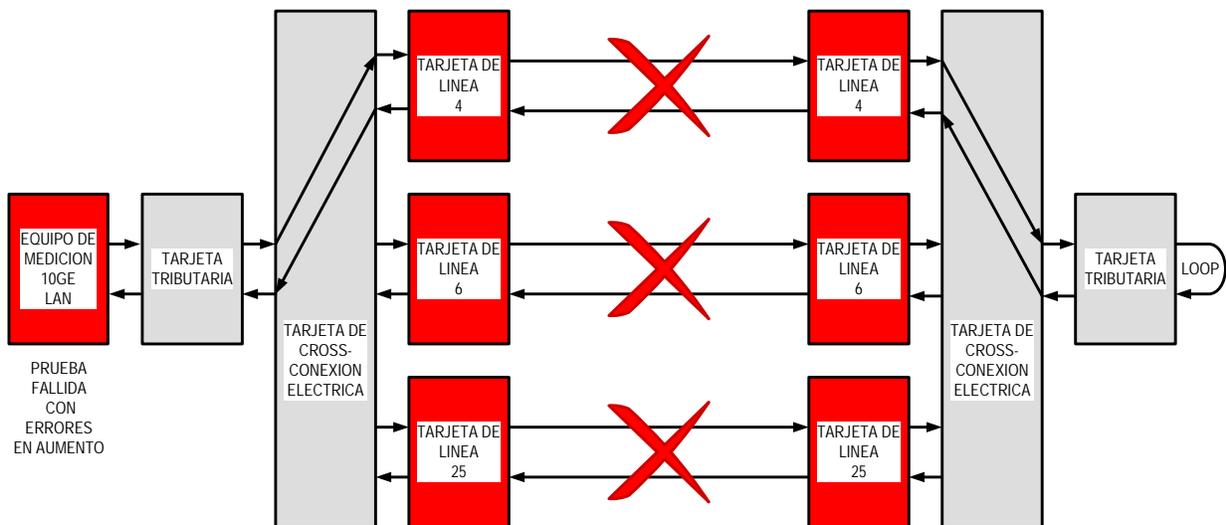


Figura 77: Escenario Cooper con todos los LSPs interrumpidos.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

Todas las pruebas realizadas se realizaron con un dispositivo especializado fabricado por el Proveedor de Equipo de Medición que genera y analiza información de tal forma que permitió simular el tráfico un servicio 10GE LAN real mediante fibra óptica.

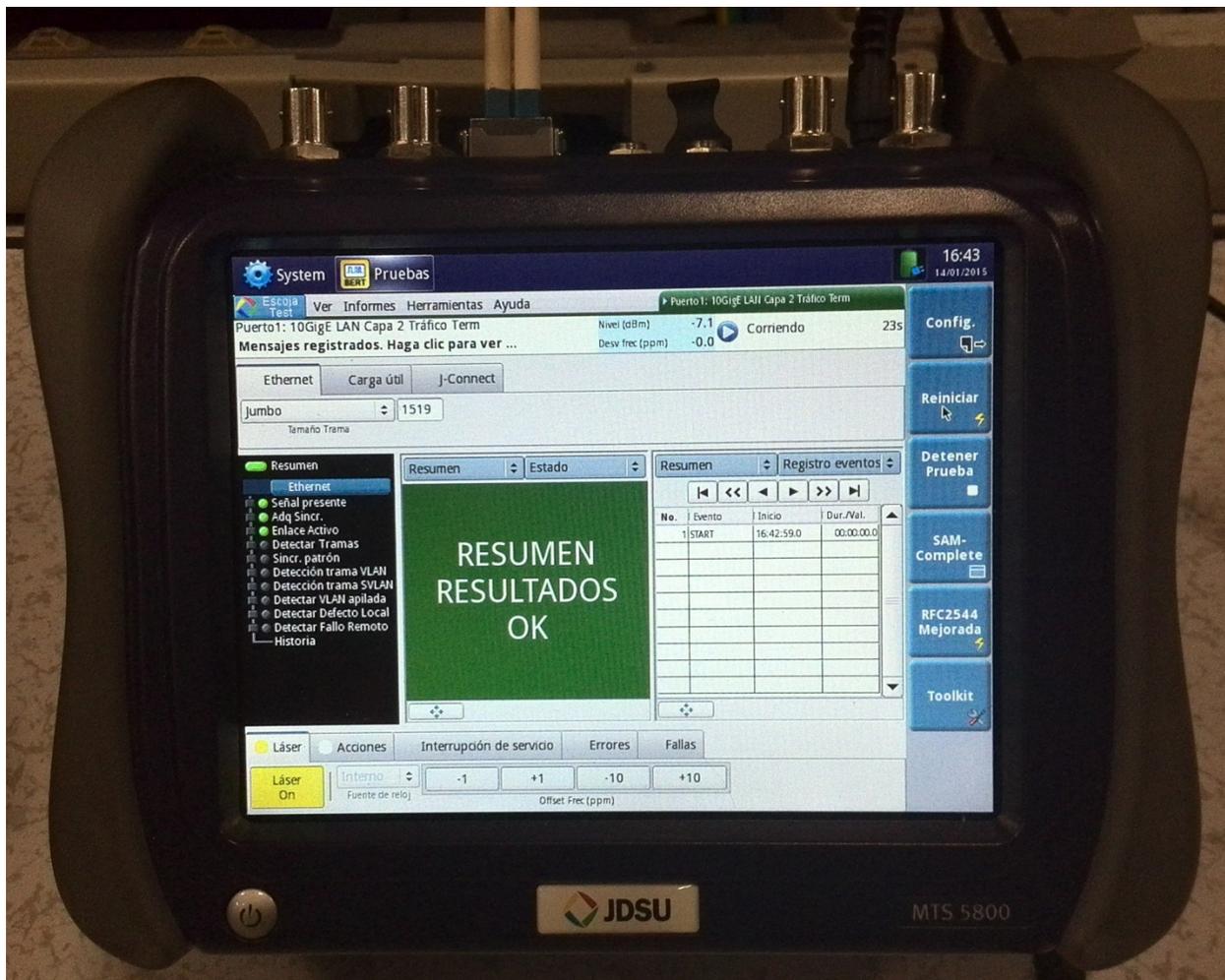


Figura 78: Equipo de Medición.

Dicho Equipo de Medición no permite visualizar directamente el tiempo de interrupción para tipo de servicio configurado, por lo que los tiempos de restauración se tuvieron que obtener mediante una serie de cálculos aritméticos basados en las siguientes ecuaciones:

Considerando¹⁴:

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{1}{\text{[?]} + \text{[?]}} \right) \\
 & \left(\frac{\text{[?]}}{\text{[?]}} \right)
 \end{aligned}$$

Se tiene que¹⁵:

$$\left(\frac{\text{[?]}}{\text{[?]}} \right)$$

Dónde:

$$\left(\frac{\text{[?]}}{\text{[?]}} \right)$$

Por lo tanto:

$$\left(\frac{\text{[?]}}{\text{[?]}} \right)$$

Ecuación 2: Modelo teórico para calcular el tiempo de conmutación de un servicio 10GE LAN.

Es importante mencionar que las ecuaciones anteriores se aplican en una situación donde se monitorea el comportamiento una unidad de tipo frame (trama), pero también se pueden utilizar para unidades de tipo block (bloque) o packet (paquete).

Después de realizar todos los experimentos descritos en la matriz de pruebas, se identificaron dos principales escenarios; cuando se tiene una Restauración Rápida y cuando se tiene una Restauración Lenta.

¹⁴ Norma IEEE 802.3™-2012: Standard for Ethernet.
¹⁵ JDSU MTS 5800: Manual de Usuario.

A continuación se muestra uno de los casos en donde se identificó el escenario de **Restauración Lenta** así como la forma como se calculó su tiempo de conmutación:

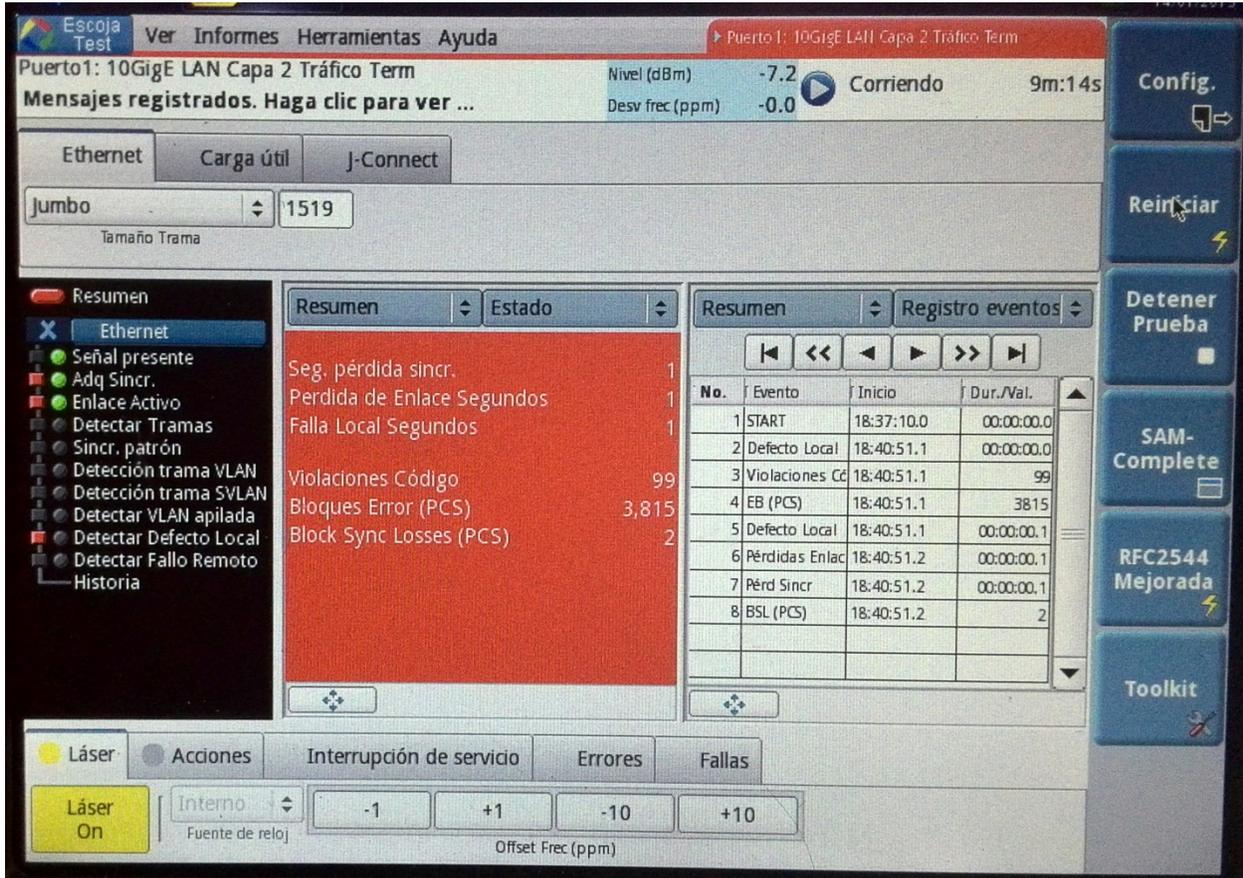


Figura 80: Errores generados durante un caso de Restauración Lenta.

De la imagen anterior se obtienen los siguientes datos:

$$\begin{aligned}
 & \left[\frac{2}{2} \right] \\
 & \left[\frac{2}{2} \right] \\
 & \left[\frac{2}{2} \right]
 \end{aligned}$$

Entonces:

$$\left(\frac{\left[\frac{2}{2} \right]}{\left[\frac{2}{2} \right]} \right) \left[\frac{2}{2} \right]$$

Ecuación 4: Cálculo del tiempo de conmutación en un escenario de Restauración Lenta.

CONCLUSIONES

Una vez realizadas las pruebas descritas, se encuentra que efectivamente el servicio Diamond con re-enrutamiento tras falla de un LSP es el que tiene mayor capacidad de sobrevivencia en una red ASON+OTN con múltiples fallas simultaneas, puesto que de existir una cantidad N de recursos disponibles, esta protección puede conmutar N veces y con un tiempo de restauración consistente únicamente en el tiempo de conmutación del mismo, el tiempo de re-enrutamiento no es percibido por el servicio cliente puesto que este se hace de manera proactiva, no bajo demanda. El tiempo que tarda en conmutar este tipo de servicio esta descrito por la siguiente ecuación:

$$T_{\text{re-enrutamiento}} = T_{\text{conmutación}} + T_{\text{re-enrutamiento}} \cdot N$$

Ecuación 5: Tiempo de Restauración Rápida.

Debido a lo anterior, este servicio es recomendado para aplicaciones de alta relevancia y baja latencia. Las otras variantes de este servicio cambian el comportamiento del mecanismo re-enrutamiento del mismo, por ejemplo, el servicio Diamond con re-enrutamiento tras falla de dos LSPs, presenta un tiempo de interrupción igual al tiempo de restauración rápida en la primera falla, pero a partir de la segunda falla el tiempo de interrupción será el tiempo de restauración lenta (siempre y cuando existan recursos suficientes) tal y como lo describe la siguiente ecuación:

$$T_{\text{interrupción}} = T_{\text{re-enrutamiento}} + T_{\text{re-enrutamiento}} \cdot N + T_{\text{re-enrutamiento}} \cdot (N - 1) \cdot T_{\text{re-enrutamiento}} \cdot N$$

Ecuación 6: Tiempo de Restauración Lenta.

La ultima variante del servicio Diamond, es decir, Diamond sin re-enrutamiento se comporta como una protección ODUk-SNCP tradicional, donde solo existen los LSP de Trabajo y Protección, al momento de fallar Trabajo, el servicio es conmutado a Protección y el tiempo de interrupción es igual al tiempo de conmutación, como en la ecuación del tiempo de restauración rápida. Al fallar el LSP de Protección, ningún re-enrutamiento es activado. Al fallar ambos LSP, ningún re-enrutamiento es activado y el servicio es interrumpido hasta que alguno de los LSPs reestablezca. Sin importar que existan recursos disponibles.

Por su parte los servicios Silver, consisten de un solo LSP activo, que al momento de fallar, busca una ruta alternativa, es decir, un LSP alternativo para restaurar el servicio. En todas las variantes de los servicios Silver, el tiempo de interrupción es igual al

tiempo de restauración lenta, es decir, considera el tiempo de conmutación más el tiempo de re-enrutamiento (siempre y cuando existan recursos disponibles). La creación de TE Links con distinto costo permitió asignar una intención al mecanismo de re-enrutamiento de los servicios Silver, lo cual puede ser utilizado para predisponer a la red ASON en la utilización de enlaces específicos, dependiendo de las características particulares de los mismos.

El servicio Cooper se comportó como un servicio no protegido de una red tradicional, es decir, al interrumpirse su LSP activo, no hubo ni conmutación ni re-enrutamiento, por lo tanto se interrumpió.

A continuación se presenta a una tabla que compara la eficiencia de utilización de recursos de una red OTN+ASON con el tipo de servicio configurado en la misma considerando un solo tipo de servicio configurado en toda la red.

Tipo de servicio ASON	Eficiencia de utilización de ancho de banda (%)
Diamond	100%
Silver	100%
Cooper	100%

Tabla 17: Eficiencia de utilización de ancho de banda por tipo de servicio ASON.

En la tabla anterior se puede observar que los servicios Diamond, son los más robustos, pero también son los que necesitan mayor cantidad de recursos. Asimismo los servicios Silver presentan un equilibrio entre la disponibilidad y la utilización de recursos. Por su parte los servicios Cooper no tienen ningún tipo de protección pero permiten la utilización de los recursos de la red al 100%.

Finalmente es importante mencionar que se cumplieron los objetivos de la presente tesis puesto que se pudieron llevar a cabo las pruebas descritas con equipos de transmisión y medición reales. Sin embargo se hubieran podido obtener valores de tiempos de conmutación de una manera más directa con otro tipo de servicio, como el STM64.

BIBLIOGRAFÍA

A continuación se mencionan las fuentes utilizadas durante la elaboración de este trabajo. Por las características de tema, la totalidad de la documentación teórica fue traducida del idioma Inglés, por lo que es posible que existan mínimas diferencias de significado durante el proceso de traducción o palabras que no pudieron ser traducidas debido a la falta de concatenación con el idioma Español. Asimismo, la totalidad de estas referencias provienen de libros o normas emitidas por organismos de normalización internacional de dominio público.

❖ CAPÍTULO 2

- DWDM: NETWORKS, DEVICES, AND TECHNOLOGY, Stamatios V. Kartalopoulos, Editorial IEEE Press, USA, 2003.
- NEXT GENERATION OPTICAL NETWORKS, Peter Tomsu, Editorial Prentice Hall, Impreso en USA, 2002.
- DATA AND COMPUTER COMMUNICATIONS, William Stallings, Editorial Prentice Hall, Impreso en USA, 2004.
- Norma ITU-T G.694.1: Matriz Espectral para aplicaciones DWDM.
- Norma ITU-T G.698.1: Aplicaciones Multicanal DWDM con Interfaces Ópticas de Canal Simple.
- Norma ITU-T G.692: Interfaces Ópticas para Sistemas Multicanal con Amplificadores Ópticos.
- Norma ITU-T G.709: Interfaces for the Optical Transport Network (OTN).

❖ CAPÍTULO 3

- Norma ITU-T G.8080: Architecture for the Automatically Switched Optical Network (ASON).
- Norma ITU-T G.8081: Terms and definitions for Automatically Switched Optical Networks (ASON).
- Norma ITU-T G.7712: DCN for ASON Networks.
- Norma ITU-T G.7713: Signaling for ASON Networks.
- Norma ITU-T G.7714: Discovery for ASON Networks.
- Norma ITU-T G.7715: Architecture and requirements for routing in the Automatically Switched Optical Networks.
- Norma ITU-T G.7716: Control Plane for ASON Networks.
- Norma ITU-T G.7718: Framework for ASON management.
- Norma IETF RFC 3945: Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture.
- Norma IETF RFC 3471: Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Functional Description.
- Norma IETF RFC 3473: Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering (RSVP-TE) Extensions.
- Norma IETF RFC 4204: Link Management Protocol (LMP).
- Norma IETF RFC 4258: Requirements for Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Routing for Automatically Switched Optical Network.
- Norma IETF RFC 4203: OSPF Extensions in support of Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS).
- Norma IETF RFC 4257: Framework for Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS)-based Control of Synchronous Digital Hierarchy (SDH).
- Norma IETF RFC 4426: Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Recovery Functional Specification.

❖ CAPÍTULO 5

- Norma IEEE 802.3™-2012: Standard for Ethernet.
- JDSU MTS 5800: Manual de Usuario.

GLOSARIO

AIS	Alarm Indication Signal
API	Access Point Identifier
APS	Automatic Protection Switching
ASON	Automatically Switched Optical Network
BDI	Backward Defect Indication
BEI	Backward Error Indication
BER	Bit Error Rate
BERT	Bit Error Rate Tester
BIAE	Backward Incoming Alignment Error
BIP8	Bit Interleaved Parity 8
BMP	Bit-synchronous Mapping Procedure
CBR	Constant Bit Rate
CCI	Connection Control Interface
CM	Connection Monitoring
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSF	Client Signal Fail
CSPF	Constrained Shortest Path First
DCM	Dispersion Compensation Module
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDC	Error Detection Code
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
EMS	Element Management System
EOS	End of Sequence
EXP	Experimental
FAS	Frame Alignment Signal
FC	Fibre Channel
FDI	Forward Defect Indication
FDM	Frequency Division Multiplexing
FEC	Forward Error Correction
GCC	General Communication Channel
GE	Gigabit Ethernet
GMP	Generic Mapping Procedure
GMPLS	Generalized Multi-Protocol Label Switching
GPON	Gigabit-capable Passive Optical Networks
IAE	Incoming Alignment Error
IP	Internet Protocol
ITU-T	International Telecommunication Union - Standardization Sector

JC	Justification Control
JOH	Justification Overhead
LCAS	Link Capacity Adjustment Scheme
LF	Local Fault
LMP	Link Management Protocol
LSP	Label Switched Path
MFAS	Multi Frame Alignment Signal
MFI	Multi Frame Indicator
MS	Maintenance Signal
MSB	Most Significant Bit
MSI	Multiplex Structure Identifier
NE	Network Element
NMS	Network Management System
NNI	Network Node Interface
OADM	Optical Add Drop Multiplexer
OCC	Optical Channel Carrier
OCh	Optical channel with full functionality
OCh	Optical Channel
OCI	Open Connection Indication
OC-n	Optical Carrier
ODTUG	Optical channel Data Tributary Unit Group
ODU	Optical Datagram Unit
ODU	Optical channel Data Unit
ODUk	Optical channel Data Unit-k
O-E-O	Optical - Electrical - Optical
OH	Overhead
OLP	Optical Line Protection
OMFI	OPU Multi-Frame Identifier
OMS	Optical Multiplex Section
OMS-OH	Optical Multiplex Section Overhead
OPU	Optical Payload Unit
OSI	Open Systems Interconnection
OSPF	Open Shortest Path First
OTN	Optical Transport Network
OTS	Optical Transport Section
PM	Path Monitoring
PT	Payload Type
RFC	Request For Comments
ROADM	Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer
RSVP-TE	Resource Reservation Protocol - Traffic Engineering
SD	Signal Degradation
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SF	Signal Failure
SFP	Small Form factor Pluggable module
SLA	Service Level Agreement

SM	Section Monitoring
SNCP	Sub Network Connection Protection
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
STAT	Status
STM	Synchronous Transport Module
TCM	Tandem Connection Monitoring
TCP	Transmission Control Protocol
TE Link	Traffic Engineering Link
TTI	Trail Trace Identifier
UTP	Unshielded Twisted Pair cable
VIP	Very Important Person
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WTR	Wait To Restore