

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Conversión de Amplificador Lineal Óptico hacia ROADM para implementación de servicio de protección redundante

INGE-2864

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Telecomunicaciones

Presentado por:

Ricky David Cruz Intriago

Bing Samuel Nevárez Garzón

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

A mis padres, Roberto Cruz y Tania Intriago, por ser mi mayor inspiración. Gracias por su lucha incansable, por enseñarme con su ejemplo que el esfuerzo siempre da frutos y por brindarme siempre su apoyo incondicional. Cada uno de mis logros es también un reflejo del sacrificio y amor que me han entregado.

A mis abuelos, Luis Cruz, Margarita Pinto, Polo Intriago y Martha Loor, quienes con su sabiduría, consejos y cariño me han acompañado en este camino. Sus palabras y enseñanzas han sido una guía constante que me ha dado fuerzas para continuar y superar los desafíos que se presentaron

Y por último, pero no menos importante, a la familia Mancini, por abrirme sus brazos y brindarme apoyo como si fuera uno más de los suyos. Su motivación, confianza y compañía fueron fundamentales para que pudiera llegar hasta aquí y culminar con éxito esta etapa de mi vida.

Ricky David Cruz Intriago

Dedicatoria

Este logro no habría sido posible sin el amor y el apoyo incondicional de mis padres, Marcela y Bing, quienes han estado conmigo en cada paso de este camino. Sus enseñanzas, su confianza y su compañía constante han sido la fuerza que me impulsó a superar cada obstáculo y alcanzar esta meta

A mis tíos, Miguel y Raquel, les agradezco por nunca dejarme solo, por convertirse en un pilar fundamental en mi vida

A mi sobrino Isaac, quien se ha convertido en una de las personas más importantes de mi vida, le agradezco por su cercanía y su apoyo constante, que han sido fundamentales en este recorrido.

También guardo en mi corazón a mis amigos Reynaldo, Christian Luz, Christian Solís, Álvaro, Marco, Ricardo, Walter, Jandry, Andrés y Sebastián “el Che”, porque en los momentos más duros estuvieron allí, con su amistad sincera y su apoyo desinteresado, dándome la fuerza que necesitaba cuando más lo requería.

Bing Samuel Nevárez Garzón

Declaración Expresa

Nosotros Cruz Intriago Ricky David y Nevárez Garzón Bing Samuel acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 9 de septiembre del 2025.

Ricky David Cruz Intriago

Bing Samuel Nevárez Garzón

Evaluadores

Ph.D. Patricia Ximena Chavez Burbano

Profesor de Materia

Ph.D. Francisco Vicente Novillo

Parales

Tutor de proyecto

Resumen

El proyecto aborda la necesidad de modernizar el nodo OLA de la red nacional de transporte óptico en Ecuador, con el objetivo de transformarlo en un nodo ROADM que incremente la resiliencia y flexibilidad de la infraestructura. La hipótesis sostiene que la actualización permitirá reducir la saturación de canales, mejorar la calidad de servicio y garantizar la continuidad de los servicios críticos. Esta conversión se justifica por la creciente demanda de tráfico IP, la ocupación superior al 85 % en la ruta de respaldo y la ausencia de capacidad para habilitar rutas dinámicas en el diseño pasivo actual. Para el desarrollo, se emplearon equipos Huawei ópticos y eléctricos de última generación, tarjetas WSS y EDFA, además de normas ITU-T G.652, G.694.1 y G.709, validando parámetros de latencia, OSNR y dispersión mediante simulaciones técnicas. Los resultados evidenciaron una reducción de la latencia en un 35–40 %, recuperación de hasta un 60 % del espectro y disminución del consumo energético en un 40 %. Se concluye que la modernización a ROADM fortalece la disponibilidad, eficiencia operativa y sostenibilidad de la red.

Abstract

This project addresses the need to modernize the OLA node of the national optical transport network in Ecuador, with the objective of converting it into a ROADM node that enhances resilience and flexibility of the infrastructure. The hypothesis establishes that this upgrade will reduce channel saturation, improve service quality, and ensure continuity of critical applications. The justification lies in the growing IP traffic demand, the backup route operating above 85% capacity, and the lack of dynamic routing in the current passive design. For the development, Huawei next-generation optical and electrical equipment, WSS and EDFA cards were employed, together with ITU-T G.652, G.694.1, and G.709 standards, validating optical parameters such as latency, OSNR, and dispersion through technical simulations. Results showed a latency reduction of 35–40%, spectrum recovery up to 60%, and an energy consumption decrease of 40% per channel. It is concluded that the migration to ROADM strengthens availability, operational efficiency, and sustainability of the optical transport network.

Índice General

Resumen	I
<i>Abstract</i>	II
Índice General	III
Abreviaturas.....	V
Simbología.....	VII
Índice de ilustraciones	VIII
Índice de tablas	VIII
CAPÍTULO 1	0
1 Introducción.....	2
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema	5
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo General	6
1.3.2 Objetivos específicos	6
1.4 Marco teórico.....	7
1.5 Multiplexación por División en Longitud de Onda (<i>WDM</i>).....	7
1.6 Multiplexación por División en Longitud de Onda Densa (<i>DWDM</i>).....	8
1.7 Multiplexores Ópticos de Adición y Sustracción Reconfigurables (<i>ROADM</i>)	9
1.8 Amplificadores de Línea Óptica (<i>OLA</i>)	9
1.9 Ecualización de longitudes de onda (<i>Lambdas</i>).....	10
1.10 Redundancia en redes de transporte óptico	11
1.11 Saturación de canales en redes ópticas.....	11
1.12 Plataforma Huawei <i>OptiX OSN 9800</i>	12
1.13 Equipos ópticos <i>WDM</i> en un sitio <i>ROADM</i>	12
1.14 Equipos eléctricos <i>WDM</i> en un sitio <i>ROADM</i>	13
1.15 Calidad de Servicio (<i>QoS</i>) en Redes Ópticas	14
CAPÍTULO 2	17
2 Metodología	18
2.1 Análisis del estado actual de la red óptica y del sitio	18

2.2	Arquitectura propuesta y equipos seleccionados.....	20
2.3	Protocolos de control y gestión	23
2.4	Diseño preliminar de la configuración	25
2.5	Documentación técnica y lineamientos de implementación	25
	CAPÍTULO 3	23
3	Resultados y análisis	24
3.1	Estado actual y diagnóstico de la red.....	24
3.2	Optimización de la ruta óptica y reducción de latencia.....	25
3.3	Recuperación de espectro y mitigación de saturación	26
3.4	Mejora de resiliencia mediante rutas de protección.....	27
3.5	Direccionamiento local y expansión de servicios	28
3.6	Sostenibilidad y eficiencia operativa	29
3.7	Comparación antes y después de la modernización OLA → ROADM.....	29
3.8	Validación de compatibilidad técnica	32
	CAPITULO 4	39
4	Conclusiones y Recomendaciones.....	40
4.1	Conclusiones	40
4.2	Recomendaciones	41
	Bibliografía	43

Abreviaturas

AWG	Arrayed Waveguide Grating (Red de difracción de guía de onda)
CDC	Colorless, Directionless, Contentionless (sin color, sin dirección, sin contención)
DAP / DAPXF	Tarjetas de Amplificación Óptica (Erbium-Doped Fiber Amplifier)
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing (Multiplexación por División en Longitud de Onda Densa)
DWSS20	Tarjeta de conmutación de longitud de onda con granularidad extendida
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier (Amplificador de Fibra Dopada con Erbio)
GMPLS	Generalized Multiprotocol Label Switching
IP	Internet Protocol (Protocolo de Internet)
IoT	Internet of Things (Internet de las Cosas)
IT	Information Technology (Tecnologías de la Información)
ITU-T	International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector (Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector de Normalización)
LOS	Loss of Signal (Pérdida de Señal)
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems (Sistemas microelectromecánicos)
MTTR	Mean Time To Repair (Tiempo Medio de Recuperación)
NMS	Network Management System (Sistema de Gestión de Red)
NCE	Network Cloud Engine (Plataforma de gestión de Huawei)
OLA	Optical Line Amplifier (Amplificador de Línea Óptica)
OSNR	Optical Signal-to-Noise Ratio (Relación Señal-Ruido Óptico)
OSN	Optical Switching Network (Serie Huawei OptiX OSN 9800)
OSU	Optical Service Unit (Unidad de Servicio Óptico)

OTDR	Optical Time-Domain Reflectometer (Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo)
OTN	Optical Transport Network (Red de Transporte Óptico)
OTRI	Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación
QoS	Quality of Service (Calidad de Servicio)
ROADM	Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer (Multiplexor Óptico de Adición/Sustracción Reconfigurable)
SDH	Synchronous Digital Hierarchy (Jerarquía Digital Síncrona)
SDN	Software Defined Networking (Redes Definidas por Software)
SLA	Service Level Agreement (Acuerdo de Nivel de Servicio)
SOA	Semiconductor Optical Amplifier (Amplificador Óptico Semiconductores)
UPS	Uninterruptible Power Supply (Sistema de Alimentación Ininterrumpida)
VC	Virtual Container (Contenedor Virtual, usado en SDH/OTN)
WDM	Wavelength Division Multiplexing (Multiplexación por División en Longitud de Onda)
WSMD9	Tarjeta Wavelength Selective Switch (Switch Selectivo de Longitud de Onda, WSS)
WSS	Wavelength Selective Switch (Comutador Selectivo de Longitud de Onda)

Simbología

dB	Decibelio (unidad logarítmica de potencia o atenuación)
dBm	Decibelio-milivatio (unidad de potencia relativa a 1 mW)
Gbps	Gigabits por segundo (velocidad de transmisión de datos)
Gbit/s	Gigabits por segundo (otra notación para Gbps, usada en normas ITU y Huawei)
km	Kilómetro (unidad de distancia de fibra óptica)
λ (lambda)	Longitud de onda (señal óptica individual en sistemas WDM/DWDM)
ms	Milisegundo (unidad de tiempo, usada para latencia y restauración)
nm	Nanómetro (unidad de longitud de onda en espectro óptico, ej. 1550 nm)
O/E/O	Óptico–Eléctrico–Óptico (conversión de señal entre dominios)
ps/nm·km	Picosegundos por nanómetro-kilómetro (coeficiente de dispersión cromática en fibras ópticas)
Tbit/s	Terabits por segundo (velocidad de transmisión de datos)

Índice de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 2.1 ARQUITECTURA ACTUAL DE LA RED.	19
ILUSTRACIÓN 2.2 GANANCIA EFECTIVA DE LOS EQUIPOS EXISTENTES	20
ILUSTRACIÓN 2.3 RUTA TRONCAL SATURADA	20
ILUSTRACIÓN 2.4 DETALLES DE LAS FIBRAS QUE INTERCONECTAN EL SITIO OLA CON SUS VECINOS	22
ILUSTRACIÓN 2.5 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SEÑAL EN EL SITIO OLA.	22
ILUSTRACIÓN 2.6 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA PARA LA MODERNIZACIÓN DEL SITIO OLA A ROADM.	23
ILUSTRACIÓN 3.1 TOPOLOGÍA DESPUÉS DE LA MIGRACIÓN OLA A ROADM	25
ILUSTRACIÓN 3.2 RUTA ALTERNATIVA PROPUESTA	26
ILUSTRACIÓN 3.3 ANILLO PROPUESTO.	26
ILUSTRACIÓN 3.4 SERVICIOS A TRAVÉS DEL SITIO OLA.	27
ILUSTRACIÓN 3.5 ESTADO DE LOS ENLACES HACIA EL SITIO OLA EN TIEMPO REAL.	27
ILUSTRACIÓN 3.6 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SEÑAL ÓPTICA DESPUÉS DE MIGRACIÓN A ROADM DEL SITIO.	28
ILUSTRACIÓN 3.7 GRÁFICO COMPARATIVO OLA VS ROADM	31
ILUSTRACIÓN 3.8 FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ACUMULADA CDF DE LATENCIA	31

Índice de tablas

TABLA 3.1 ESTADO ACTUAL DEL NODO OLA	24
TABLA 3.2 TABLA COMPARATIVA OLA -> ROADM	30

CAPÍTULO 1

1 Introducción

En la era digital actual, la demanda de servicios de telecomunicaciones de alta capacidad y disponibilidad ha experimentado un crecimiento exponencial. La proliferación de aplicaciones de banda ancha, servicios en la nube, transmisión de video en alta definición y la expansión de la Internet de las Cosas (IoT) han impuesto exigencias sin precedentes a las infraestructuras de redes ópticas (CISCO, 2023). En este contexto, las tecnologías de Multiplexación por División en Longitud de Onda (WDM) y su variante más avanzada, la Multiplexación por División en Longitud de Onda Densa (DWDM), junto con los Multiplexores Ópticos de Adición y Sustracción Reconfigurables (ROADM), han emergido como soluciones clave para satisfacer estas crecientes necesidades (Ramaswami, Sivarajan, & Sasaki, 2009).

El presente proyecto se centra en el diseño de la conversión del sitio *OLA*, actualmente configurado como un amplificador de línea óptica pasivo, a un nodo *ROADM* dentro de una red *DWDM* coherente. Esta transformación tiene como objetivo habilitar una nueva ruta de protección redundante para el servicio de transporte *IP*, en respuesta a la saturación de la ruta de respaldo existente. La implementación de esta solución permitirá mejorar la resiliencia, flexibilidad y capacidad de la red, alineándose con las tendencias tecnológicas actuales y futuras en el ámbito de las telecomunicaciones (Mukherjee, 2006).

1.1 Descripción del problema

La infraestructura de red existente presenta una configuración en la que el sitio *OLA* (Optical Line Amplifier) funciona como un nodo pasivo dentro de la red nacional de transporte *DWDM* coherente, desempeñando exclusivamente funciones de amplificación óptica sin capacidad de conmutación, monitoreo ni gestión dinámica del tráfico. Esta condición limita

significativamente la flexibilidad de la red para adaptarse a las variaciones en la demanda de tráfico o responder eficientemente ante fallos en los enlaces principales (Mann, Shastri, & Raj, 2020).

Actualmente, este nodo forma parte de una ruta secundaria que fue originalmente diseñada como respaldo para una ruta troncal de gran capacidad. Sin embargo, debido al crecimiento sostenido de servicios IP, interconexiones regionales y tráfico de centros de datos interprovinciales, esta ruta de protección se encuentra operando con una ocupación de canales superior al 85 %. Se ha documentado que varios lambdas en esa ruta funcionan constantemente en régimen de alta carga, y que, en situaciones de conmutación forzada por fallos en la ruta principal, ya no existen canales disponibles para transportar tráfico crítico sin degradación significativa (Ghannam, Elrasheed, & Alresheedi, 2022).

Uno de los principales desafíos identificados es la imposibilidad de habilitar nuevas rutas ópticas o redistribuir dinámicamente el tráfico desde este nodo, ya que al tratarse de un sitio pasivo, cualquier modificación implica intervención física sobre la infraestructura. Esta rigidez técnica no solo dificulta la provisión de nuevos servicios en áreas cercanas, sino que también ha provocado, en eventos recientes, la pérdida parcial de servicios corporativos de misión crítica por falta de canales ópticos disponibles para protección efectiva (Miyamoto, Kawanishi, & Tomita, 2013).

En particular, se ha reportado que durante un mantenimiento preventivo en la ruta troncal, los canales de respaldo no lograron absorber completamente el tráfico de las interfaces de 100 Gbps, generando microcortes y alarmas de pérdida de señal (LOS) en nodos downstream (Li, Zhang, & Chen, 2021).

Además, el incremento de tráfico generado por aplicaciones como servicios en la nube, acceso remoto a plataformas educativas y transmisión en vivo desde dispositivos móviles ha contribuido a que los lambdas de la red DWDM coherente que atraviesan este tramo se encuentren cada vez más comprometidos en términos de potencia, oscilaciones de ganancia y riesgo de interferencia por falta de ecualización dinámica (Berruti, Fiorani, & Wosinska, 2019).

En el contexto de la red nacional de transporte óptico en Ecuador, donde se requiere alta disponibilidad para garantizar la conectividad entre provincias, servicios de salud digital, educación en línea y plataformas gubernamentales, la falta de redundancia efectiva y de capacidad de crecimiento representa una amenaza directa para la continuidad operativa de múltiples servicios esenciales (Mann, Shastri, & Raj, 2020), (Berruti, Fiorani, & Wosinska, 2019).

Ante esta situación, se propone la transformación del nodo OLA actual en un nodo ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer). Esta actualización permitirá no solo la habilitación de una nueva ruta secundaria desde este punto —descomprimiendo la actual ruta de protección— sino también la segmentación del tráfico por tipo de servicio, la inserción dinámica de nuevos lambdas y la implementación de políticas de restauración automatizadas (Ghannam, Elrasheed, & Alresheedi, 2022), (Berruti, Fiorani, & Wosinska, 2019).

Además, la reconfiguración permitirá expandir la capacidad de la red sin intervenciones físicas, mejorando la eficiencia en la provisión de nuevos servicios y asegurando la resiliencia de la infraestructura de transporte óptico a nivel nacional (Mann, Shastri, & Raj, 2020), (Li, Zhang, & Chen, 2021).

1.2 Justificación del problema

La conversión del sitio *OLA* a un nodo *ROADM* dentro de una red *DWDM* coherente se justifica por la necesidad de mejorar la resiliencia, flexibilidad y capacidad de la infraestructura de red. La implementación de nodos *ROADM* permite la conmutación óptica dinámica, la gestión eficiente del espectro y la creación de rutas de protección redundantes, lo que resulta esencial para garantizar la continuidad y calidad del servicio de transporte *IP*.

Además, la tecnología *ROADM* proporciona la capacidad de agregar, eliminar o redirigir señales ópticas específicas en una red *DWDM* sin necesidad de conversión óptico-eléctrico-óptico, lo que mejora la eficiencia y reduce la latencia (Dochhan, et al., Flexible metro network architecture based on wavelength blockers and coherent transmission, 2020). Por otro lado, los *ROADMs* modernos pueden ser direccionales, sin color, sin contención y sin rejilla, lo que significa que pueden manejar cualquier longitud de onda en cualquier dirección, sin restricciones (Sarmiento Hernández, 2018).

La adopción de equipos avanzados como los *Huawei OSN 9800 M12, M24* y *U16* garantiza una operación confiable y eficiente. Estos equipos ofrecen capacidades de conmutación y transmisión de alta capacidad, compatibles con las tecnologías *DWDM* coherentes. El *OSN 9800 M12* es adecuado para escenarios de acceso y agregación, ofreciendo una capacidad de conmutación de hasta 4.8 Tbit/s. El *OSN 9800 M24* es ideal para redes metropolitanas y de agregación, con una capacidad de conmutación de hasta 10 Tbit/s. El *OSN 9800 U16* está diseñado para redes de *backbone*, ofreciendo una capacidad de conmutación de hasta 12.8 Tbit/s y soportando velocidades por canal de hasta 800 Gbit/s (Huawei, Light Reading, 2025).

Por último, la implementación de sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) es esencial para garantizar la continuidad del servicio en caso de fallos en la alimentación eléctrica. Estos sistemas protegen los equipos sensibles y evitan interrupciones en la transmisión de datos (Thunder-Link.com, 2025).

En resumen, la conversión del sitio *OLA* a un nodo *ROADM* dentro de una red *DWDM* coherente es una solución técnica y estratégica que fortalece la infraestructura de red, mejora la resiliencia y disponibilidad del servicio, y prepara la red para enfrentar los desafíos futuros.

1.3 Objetivos

Con el propósito de mejorar la resiliencia y flexibilidad de la red óptica, se establecen los siguientes objetivos que guiarán el desarrollo del proyecto.

1.3.1 Objetivo General

Diseñar la conversión del sitio *OLA* (Amplificador de Línea Óptica) a un nodo *ROADM* dentro de una red *DWDM* coherente, con el fin de habilitar una nueva ruta de protección redundante para el servicio de transporte *IP*, debido a la saturación de la ruta de respaldo existente.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Identificar y documentar el estado actual del sitio y su interconexión dentro de la red *DWDM* coherente.
2. Seleccionar la arquitectura y los equipos adecuados para cumplir con los requerimientos técnicos del sitio, en cuanto a capacidad de conmutación, monitoreo y soporte de servicios.

3. Elaborar un diseño preliminar de la nueva configuración del sitio, incluyendo esquemas de conexión y diagramas de bloques, que contemple la creación de una nueva ruta óptica de protección redundante a través del nodo *ROADM*.
4. Desarrollar el esquema de implementación técnica con su respectiva documentación.

1.4 Marco teórico

La evolución de las redes de telecomunicaciones ha estado marcada por la necesidad de transmitir volúmenes crecientes de datos con alta eficiencia y fiabilidad. En este contexto, las tecnologías de multiplexación óptica, la implementación de mecanismos de redundancia, la gestión de la saturación de canales y la garantía de calidad de servicio (*QoS*) se han convertido en pilares fundamentales para el diseño y operación de redes ópticas modernas.

1.5 Multiplexación por División en Longitud de Onda (WDM)

La multiplexación por división en longitud de onda (*WDM*, por sus siglas en inglés) es una técnica que permite la transmisión simultánea de múltiples señales ópticas a través de una única fibra óptica, utilizando diferentes longitudes de onda para cada señal. Esta tecnología ha sido fundamental para aumentar la capacidad de transmisión de las redes ópticas sin necesidad de instalar nuevas fibras. Como lo expresan (Ramaswami, Sivarajan, & Sasaki, 2009), “*WDM* proporciona un método rentable para expandir la capacidad de una fibra transmitiendo múltiples canales a través de ella utilizando diferentes longitudes de onda.”.

En los sistemas *WDM*, cada canal óptico opera en una longitud de onda específica, y las señales se combinan mediante un multiplexor óptico en el transmisor y se separan mediante un demultiplexor óptico en el receptor. Esta arquitectura permite una utilización eficiente del espectro óptico y facilita la expansión de la capacidad de la red de manera escalable.

Además, los dispositivos de multiplexación y demultiplexación en sistemas *WDM* han evolucionado significativamente, incorporando tecnologías como las redes de difracción de guía de onda (*AWG*) y los moduladores electroópticos en matriz. Estos componentes permiten una mayor densidad de canales y una mejor gestión del espectro óptico, contribuyendo a la eficiencia y flexibilidad de las redes ópticas modernas.

1.6 Multiplexación por División en Longitud de Onda Densa (*DWDM*)

La multiplexación por división en longitud de onda densa (*DWDM*, por sus siglas en inglés) es una evolución de la tecnología *WDM* que permite un mayor número de canales ópticos en una misma fibra, mediante un espaciamiento más estrecho entre las longitudes de onda. “Los sistemas *DWDM* utilizan longitudes de onda estrechamente espaciadas para aumentar la capacidad de los sistemas de comunicación por fibra óptica, permitiendo cientos de canales en un solo par de fibras” (Yuan & Wang, 2013).

En particular, la tecnología *DWDM* ha sido clave para satisfacer la creciente demanda de ancho de banda en aplicaciones como la transmisión de video en alta definición, servicios en la nube y la expansión de la Internet de las Cosas (*IoT*). Además, la capacidad de transmitir múltiples señales a través de una sola fibra reduce los costos de infraestructura y facilita la gestión de la red.

Asimismo, los sistemas *DWDM* también han incorporado avances en la amplificación óptica, como los amplificadores de fibra dopada con erbio (*EDFA*), que permiten la amplificación simultánea de múltiples canales sin necesidad de conversión óptico-eléctrico-óptico. Como lo detallan (Kaminow, Li, & Willner, 2013), “los *EDFA* permiten la amplificación simultánea de un amplio espectro de longitudes de onda, lo cual es un pilar fundamental de los sistemas *DWDM*.”.

1.7 Multiplexores Ópticos de Adición y Sustracción Reconfigurables (*ROADM*)

Los multiplexores ópticos de adición y sustracción reconfigurables (*ROADM*, por sus siglas en inglés) son dispositivos que permiten agregar, eliminar o redirigir señales ópticas en diferentes longitudes de onda sin necesidad de convertirlas a señales eléctricas. Esta capacidad de reconfiguración dinámica es esencial para la flexibilidad y escalabilidad de las redes ópticas modernas. (Gerstel, Jinno, Lord, & Yoo, 2007) indican que “la tecnología *ROADM* ofrece encaminamiento dinámico de longitudes de onda y reconfiguración remota, lo cual reduce significativamente los costos operativos y permite la provisión bajo demanda.”.

Para lograr esto, los *ROADMs* utilizan tecnologías como los conmutadores ópticos basados en *MEMS* (sistemas microelectromecánicos), cristales líquidos y circuitos integrados fotónicos para lograr la conmutación de longitudes de onda. Estas tecnologías permiten una gestión eficiente del espectro óptico y facilitan la implementación de redes ópticas ágiles y adaptativas.

Además, los *ROADMs* avanzados incorporan funciones de monitoreo y control que permiten la supervisión en tiempo real del estado de la red y la implementación de políticas de calidad de servicio (*QoS*). Estas capacidades son fundamentales para garantizar la fiabilidad y el rendimiento de las redes ópticas de próxima generación.

1.8 Amplificadores de Línea Óptica (*OLA*)

Los amplificadores de línea óptica (*OLA*, por sus siglas en inglés) son dispositivos que amplifican las señales ópticas a lo largo de la fibra para compensar las pérdidas de atenuación y mantener la calidad de la señal en enlaces de larga distancia. Según (Miyamoto, Kawanishi, & Tomita, 2013), “los *OLA* juegan un papel clave en la extensión del alcance de transmisión en redes

ópticas de larga distancia al compensar la atenuación de la fibra sin necesidad de conversión óptico-eléctrico-óptico.”.

Cabe destacar que los *OLAs* pueden ser de tipo *EDFA* o basados en amplificadores ópticos semiconductores (*SOA*), y su implementación es esencial para garantizar la integridad de la señal en redes ópticas de gran escala.

La ubicación estratégica de los *OLAs* en la red permite extender la distancia de transmisión sin necesidad de regeneración óptico-eléctrico-óptico, lo que reduce los costos y la complejidad de la infraestructura. Además, los *OLAs* modernos incorporan funciones de monitoreo y control que facilitan la gestión de la potencia óptica y la detección de fallos en la red.

1.9 Ecualización de longitudes de onda (*Lambdas*)

La ecualización de longitudes de onda, también conocida como ecualización de *lambdas*, es un proceso que busca equilibrar la potencia de las diferentes señales ópticas en un sistema de multiplexación por longitud de onda. Este equilibrio es crucial para evitar interferencias y garantizar una calidad de señal uniforme en todos los canales. Según (Kaminow, Li, & Willner, 2013), “la ecualización de longitudes de onda es vital para evitar la degradación del canal debido a desequilibrios de potencia, que pueden resultar de la ganancia variable a lo largo del ancho de banda del amplificador óptico.”.

Las técnicas de ecualización pueden ser pasivas, utilizando componentes ópticos como filtros y atenuadores, o activas, mediante el ajuste dinámico de la ganancia en amplificadores ópticos. En cualquiera de los casos, la implementación de ecualización adecuada es esencial para mantener la integridad de la señal y optimizar el rendimiento de la red óptica.

1.10 Redundancia en redes de transporte óptico

La redundancia en redes de transporte óptico es una estrategia esencial para garantizar la disponibilidad y continuidad del servicio ante fallos o interrupciones. Implementar rutas de protección redundantes permite que, en caso de una falla en la ruta principal, el tráfico se redirija automáticamente a través de una ruta alternativa, minimizando así el impacto en los servicios críticos. (Ramaswami, Sivarajan, & Sasaki, 2009) explican que “la supervivencia de la red se logra mediante la implementación de mecanismos de protección y restauración, asegurando un tiempo mínimo de inactividad para las aplicaciones críticas.”.

En el contexto de redes ópticas, existen diversas técnicas para lograr redundancia, como la protección 1+1, donde se transmiten datos simultáneamente por dos rutas independientes, y la protección 1: N, donde una ruta de respaldo sirve a múltiples rutas principales. Estas estrategias son fundamentales para mantener la integridad y disponibilidad de la red, especialmente en infraestructuras críticas donde el tiempo de inactividad no es tolerable.

1.11 Saturación de canales en redes ópticas

La saturación de canales es un desafío significativo en las redes de transporte óptico. A medida que aumenta la demanda de ancho de banda, los canales existentes pueden alcanzar su capacidad máxima, lo que lleva a congestión y degradación del servicio. Como indica (Mukherjee, 2006), “a medida que la utilización del canal se acerca a los límites de capacidad, ocurre congestión, lo que conduce a pérdida de paquetes y aumento de la latencia.”.

Para mitigar este problema, se pueden emplear técnicas como la asignación dinámica de ancho de banda y la implementación de tecnologías avanzadas como *DWDM*, que permite una mayor densidad de canales en la misma fibra óptica. Además, la gestión eficiente del espectro

óptico y la implementación de algoritmos de asignación de recursos pueden ayudar a equilibrar la carga de tráfico y prevenir la saturación de canales.

1.12 Plataforma Huawei *OptiX OSN 9800*

La plataforma Huawei *OptiX OSN 9800* representa una solución de transmisión óptica de nueva generación que integra capacidades de red de transporte óptico (*OTN*) y multiplexación por división en longitud de onda densa (*DWDM*). Esta plataforma está diseñada para satisfacer las crecientes demandas de ancho de banda y flexibilidad en las redes modernas.

(Huawei, Light Reading, 2022) destaca que “la serie *OptiX OSN 9800* admite una tasa programable de 400 Gbit/s a 1,2 Tbit/s por longitud de onda, así como una evolución futura a una tasa más alta de 2 Tbit/s y más allá.”. Esta capacidad permite a los operadores escalar sus redes de manera eficiente para adaptarse al crecimiento del tráfico de datos.

Además, la plataforma ofrece una arquitectura modular que facilita la integración de diversas tarjetas ópticas y eléctricas, permitiendo una configuración flexible y una adaptación a diferentes escenarios de red.

1.13 Equipos ópticos WDM en un sitio *ROADM*

En un sitio *ROADM* (*Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer*), los equipos ópticos desempeñan un papel crucial en la manipulación y gestión de las señales ópticas. Estos equipos incluyen componentes como multiplexores/demultiplexores ópticos, amplificadores ópticos y módulos *ROADM*.

Los módulos *ROADM* permiten la adición, eliminación o redireccionamiento de señales ópticas específicas sin necesidad de conversión a señales eléctricas. Esto se logra mediante la

utilización de módulos de conmutación selectiva de longitud de onda, que permiten una configuración y reconfiguración remota de las rutas ópticas.

(Huawei, Huawei Technologies, n.d.) señala que “la serie *OptiX OSN 9800 M* adopta un diseño de integración óptico-eléctrica y permite combinaciones flexibles de diversas tarjetas ópticas y eléctricas en una plataforma unificada.”. Esta integración facilita la gestión eficiente del espectro óptico y la implementación de redes ópticas ágiles y adaptativas.

1.14 Equipos eléctricos WDM en un sitio ROADM

Los equipos eléctricos en un rack *WDM* son responsables de la conversión y procesamiento de las señales eléctricas provenientes de los servicios de cliente. Estos equipos incluyen transpondedores, multiplexores de servicios y tarjetas de procesamiento de señales.

Los transpondedores convierten las señales eléctricas de los servicios de cliente en señales ópticas con longitudes de onda específicas para su transmisión a través de la red *WDM*. Además, realizan funciones de adaptación de velocidad y formato, asegurando la compatibilidad con los estándares de la red óptica.

(Huawei, Huawei Support, 2023) destaca que “la serie *OptiX OSN 9800* puede procesar de manera flexible servicios *OTN*, *VC*, de paquetes y de unidad de servicio óptico (*OSU*) con granularidades de conmutación que van desde 2 Mbit/s hasta 100 Gbit/s.”. Esta capacidad permite una gestión eficiente de diversos tipos de tráfico en la red.

La interacción entre los equipos ópticos y eléctricos en un sitio *ROADM* es fundamental para garantizar una transmisión eficiente y flexible de los datos. Los equipos eléctricos preparan y

adaptan las señales de los servicios de cliente, mientras que los equipos ópticos gestionan la multiplexación, amplificación y enrutamiento de las señales ópticas a través de la red.

Esta colaboración permite una gestión integral del tráfico de datos, optimizando el uso del espectro óptico y asegurando la calidad del servicio. Además, la capacidad de reconfiguración dinámica de los módulos *ROADM*, combinada con la flexibilidad de los equipos eléctricos, permite a los operadores adaptarse rápidamente a las cambiantes demandas de tráfico y garantizar una alta disponibilidad de la red.

1.15 Calidad de Servicio (*QoS*) en Redes Ópticas

La calidad de servicio (*QoS*) es un aspecto crítico en las redes ópticas, ya que garantiza que los diferentes tipos de tráfico reciban el tratamiento adecuado según sus requisitos específicos. Implementar mecanismos de *QoS* permite priorizar el tráfico sensible al retardo, como la voz y el video, sobre otros tipos de tráfico menos sensibles, asegurando así una experiencia de usuario óptima. Según (Kaminow, Li, & Willner, 2013), “los mecanismos de *QoS* en redes ópticas son esenciales para gestionar demandas de tráfico heterogéneas y asegurar acuerdos de nivel de servicio (*SLA*).”.

En las redes ópticas modernas, se han desarrollado diversas estrategias para mejorar la *QoS*, incluyendo la asignación de recursos basada en políticas, la implementación de clases de servicio diferenciadas y el uso de técnicas de multiplexación estadística. Estas estrategias permiten una gestión más eficiente del tráfico y una mejor adaptación a las variaciones en la demanda de los usuarios.

Finalmente, la integración de tecnologías como los *ROADMs* y los sistemas de gestión de red avanzados también ha contribuido a mejorar la *QoS* en las redes ópticas, al permitir una mayor visibilidad y control sobre el comportamiento de la red y facilitar la implementación de políticas de calidad de servicio más sofisticadas.

Diversos investigadores han abordado la problemática de la saturación de canales en redes ópticas DWDM y la necesidad de convertir nodos pasivos en elementos inteligentes y reconfigurables para mejorar la flexibilidad y eficiencia de la red. Uno de los enfoques más destacados ha sido el empleo de tecnologías ROADM, que permiten agregar, soltar o redirigir lambdas de manera dinámica, sin intervención manual, lo cual mejora considerablemente los tiempos de recuperación ante fallos y la adaptabilidad a demandas variables de tráfico (Mann, Shastri, & Raj, 2020).

En redes nacionales y de operadores a gran escala, autores como (Ghannam, El-Bawab, & Botros, 2022). han analizado la evolución de los sitios OLA hacia nodos ROADM como parte de una estrategia de optimización de espectro óptico y resiliencia. Su estudio mostró que esta transición no solo mejora la tolerancia a fallos, sino que también permite integrar nuevos servicios sobre infraestructura ya existente sin necesidad de grandes inversiones físicas, gracias a la gestión centralizada por software y la configuración remota de los canales (Ghannam, Elrasheed, & Alresheedi, 2022).

Por otro lado, (Li, Zhang, & Chen, 2021) proponen un enfoque basado en la inteligencia artificial para anticipar la saturación de canales en redes DWDM coherentes y activar rutas alternativas automáticamente a través de nodos ROADM, lo cual incrementa la eficiencia del

enrutamiento óptico y reduce significativamente los tiempos de latencia y pérdida de paquetes durante fallos.

Además, investigaciones como las de (Berruti, Fiorani, & Wosinska, 2019) han demostrado que la conversión de sitios pasivos en nodos inteligentes no solo permite activar nuevas rutas de protección, sino que también habilita la prestación de servicios comerciales avanzados en zonas anteriormente restringidas, aprovechando capacidades latentes en la red DWDM.

En el contexto latinoamericano, estudios como el de (Rosales, Jiménez, & Arévalo, 2023) destacan la necesidad de actualización tecnológica de redes ópticas para soportar servicios digitales críticos. Su análisis en redes de transporte de países con geografías complejas, como Perú y Colombia, concluyó que la integración de nodos ROADM en sitios clave aumentó en un 35 % la disponibilidad efectiva de servicios en regiones anteriormente propensas a interrupciones.

CAPÍTULO 2

2 Metodología

La metodología desarrollada en este proyecto se orienta a diseñar una solución integral para la conversión del sitio OLA en un nodo ROADM, considerando no solo la planificación técnica, sino también la arquitectura de la red, los protocolos de control y gestión, y los componentes necesarios para garantizar la resiliencia y escalabilidad de la infraestructura óptica. A diferencia del nodo pasivo, que únicamente amplifica la señal, la transición hacia ROADM dota a la red de capacidades dinámicas, gestionables y preparadas para el crecimiento de tráfico futuro.

Este capítulo presenta de manera unificada el análisis del estado actual de la red, la explicación detallada de la arquitectura propuesta, los equipos seleccionados, el diseño preliminar de la nueva configuración y los lineamientos de implementación que sustentan la propuesta.

2.1 Análisis del estado actual de la red óptica y del sitio

El nodo OLA, en su estado actual, se encuentra limitado a funciones pasivas de amplificación. Esta condición provoca restricciones en la flexibilidad de la red, especialmente en escenarios donde se requiere redistribuir tráfico de manera dinámica o habilitar rutas de contingencia. Durante el levantamiento técnico se detectaron los siguientes puntos:

- La ruta de respaldo en la que opera el nodo alcanza una ocupación superior al 85 %, lo que reduce la disponibilidad de lambdas para la protección efectiva de tráfico en caso de fallos.
- La potencia de señal mostró fluctuaciones de ganancia, comprometiendo la estabilidad en servicios de misión crítica.

- Los niveles de atenuación se encontraron entre 11 y 21.5 dB, con una ganancia efectiva de 23.4 dB. Aunque estos valores cumplen con los estándares, no permiten nuevas inserciones de tráfico sin comprometer la calidad del servicio
- La ausencia de monitoreo en tiempo real obliga a depender de intervenciones físicas en sitio para realizar cambios de configuración o diagnósticos.

La **Ilustración 2.1** (Arquitectura actual de la red) refleja claramente este escenario, mostrando cómo el nodo OLA se limita a amplificar la señal óptica, sin capacidad de conmutación ni redistribución. Se aprecia también cómo el tráfico depende de nodos remotos para cualquier proceso de restauración o diversificación de rutas, lo que incrementa la latencia y la vulnerabilidad ante fallos.

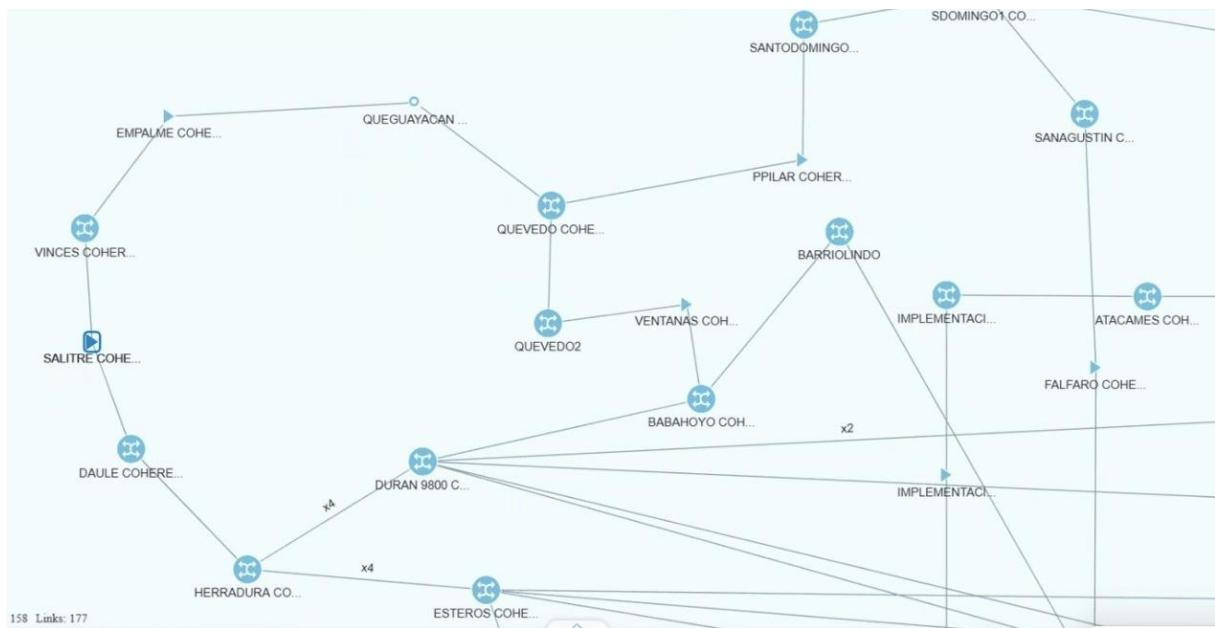


Ilustración 2.1 Arquitectura actual de la red.

Este estado pasivo ha generado limitaciones en eventos recientes: durante mantenimientos programados de la red troncal, el respaldo proporcionado por este nodo no fue suficiente para

absorber el tráfico crítico de interfaces de 100 Gbit/s, generando microcortes y alarmas de pérdida de señal. La carencia de flexibilidad y la saturación de canales vuelven evidente la necesidad de su modernización.

La **Ilustración 2.2** evidencia los niveles de ganancia efectiva de los equipos existentes, mientras que la **Ilustración 2.3** expone la saturación de la ruta troncal.

Ilustración 2.2 Ganancia efectiva de los equipos existentes

Site	OMS	OMS Group	Fiber	NE	Phase	...					
Reserve Wavelength Edit Filter Set Columns											
Phase	Name	Source Site	Sink Site	WDM Type	WDM Ba...	C+L Ready	FlexGrid	Actual Wavelen...	Max. Wavelen...	Capacity	Line F
<input type="checkbox"/>	cohere	All	All	All	All	All	All	All	All	All	All
<input checked="" type="checkbox"/>	phase_inv	DURAN_LA TRONCAL...	DURAN 9800 ...	DWDM	C80	No	Fixed	87.50%	100%	80 channels	100G
<input type="checkbox"/>	phase_inv			DWDM	C80	No	Fixed	76.25%	100%	80 channels	100G
<input type="checkbox"/>	phase_inv			DWDM	C80	No	Fixed	66.25%	100%	80 channels	100G

Ilustración 2.3 Ruta Troncal saturada

2.2 Arquitectura propuesta y equipos seleccionados

La propuesta de solución consiste en transformar el nodo OLA pasivo en un nodo ROADM completamente gestionado, tomando como base la plataforma Huawei OptiX OSN 9800, reconocida por su escalabilidad y modularidad. Esta arquitectura introduce funciones críticas de conmutación óptica dinámica, terminación de tráfico local, gestión remota y recuperación automática, permitiendo superar las limitaciones actuales.

Los principales módulos seleccionados son:

- WSMD9 (Wavelength Selective Switch – WSS): constituye el núcleo de la función ROADM. Este módulo habilita la adición, sustracción y paso (add/drop/pass-through) de lambdas de manera independiente, sin necesidad de conversión eléctrica. Su capacidad de enrutamiento dinámico de longitudes de onda en tiempo real permite que el nodo pueda reconfigurarse sin intervención física, reduciendo considerablemente el tiempo medio de restauración (MTTR).
- DWSS20: tarjeta que complementa al WSS, diseñada para escenarios donde se manejan múltiples direcciones o altos volúmenes de tráfico. Su granularidad extendida posibilita construir matrices ópticas más complejas y robustas.
- DAP/DAPXF (Amplificadores EDFA): estos módulos se encargan de la amplificación óptica. La versión DAPXF ofrece una mayor potencia de salida y un rango dinámico de ganancia variable, lo que resulta ideal para enlaces donde existen grandes fluctuaciones de atenuación como lo es el sitio OLA con sus vecinos, como se muestra en la **Ilustración 2.4**. De esta forma, se garantiza una relación señal-ruido óptica (OSNR) estable a lo largo del trayecto.
- TMD20 (Terminación de tráfico): tarjeta encargada de convertir señales ópticas a eléctricas (O/E) para su entrega a interfaces cliente. Además, habilita el direccionamiento local y permite supervisar el estado de cada canal, soportando servicios como OTN, Ethernet y SDH.

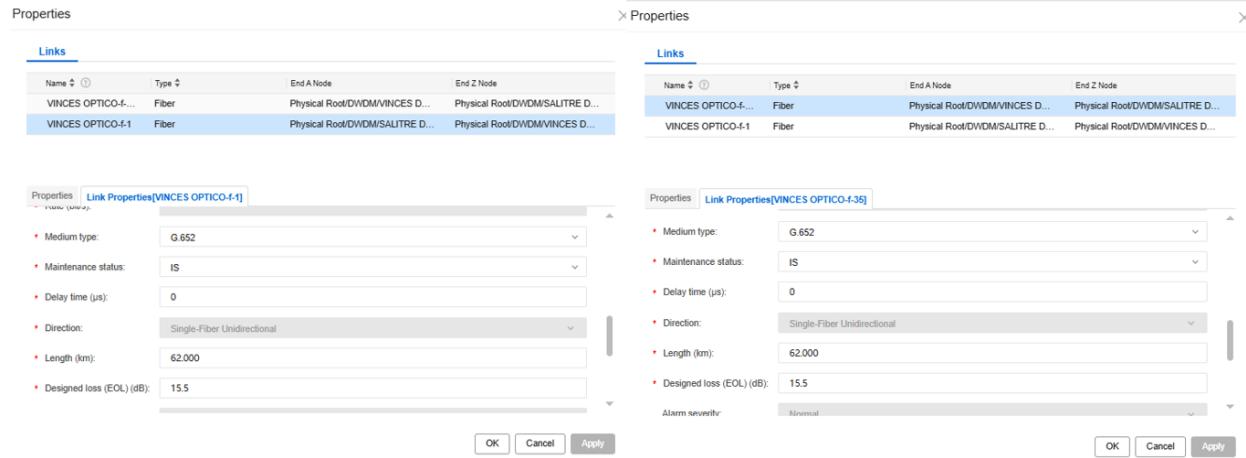


Ilustración 2.4 Detalles de las fibras que interconectan el sitio OLA con sus vecinos

La **Ilustración 2.5** muestra el flujo actual de la señal en el OLA, limitado a amplificación sin manipulación adicional

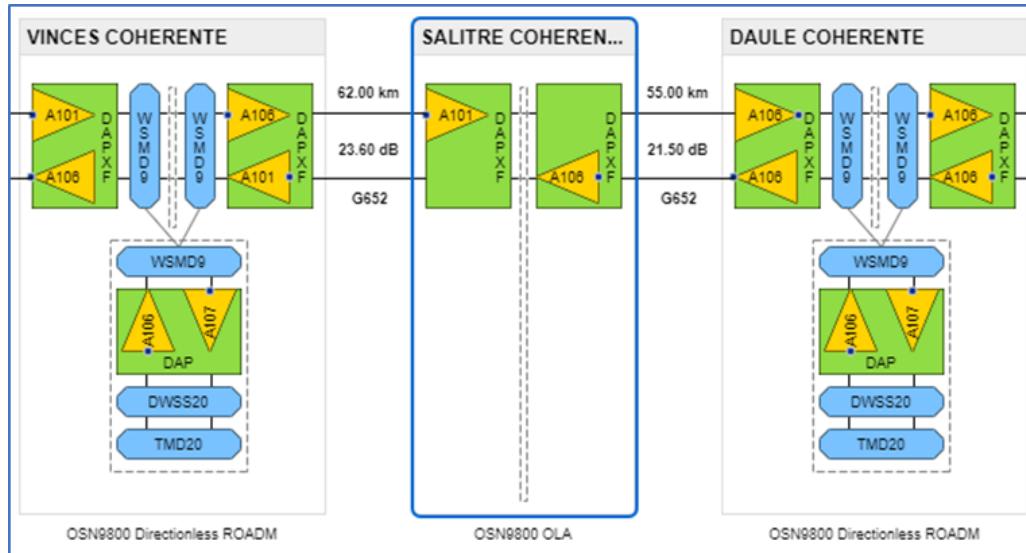


Ilustración 2.5 Diagrama de flujo de la señal en el sitio OLA.

Para complementar la descripción metodológica presentada, en la **Ilustración 2.6** se puede apreciar el diagrama de flujo de la solución propuesta para la modernización del sitio OLA a ROADM.

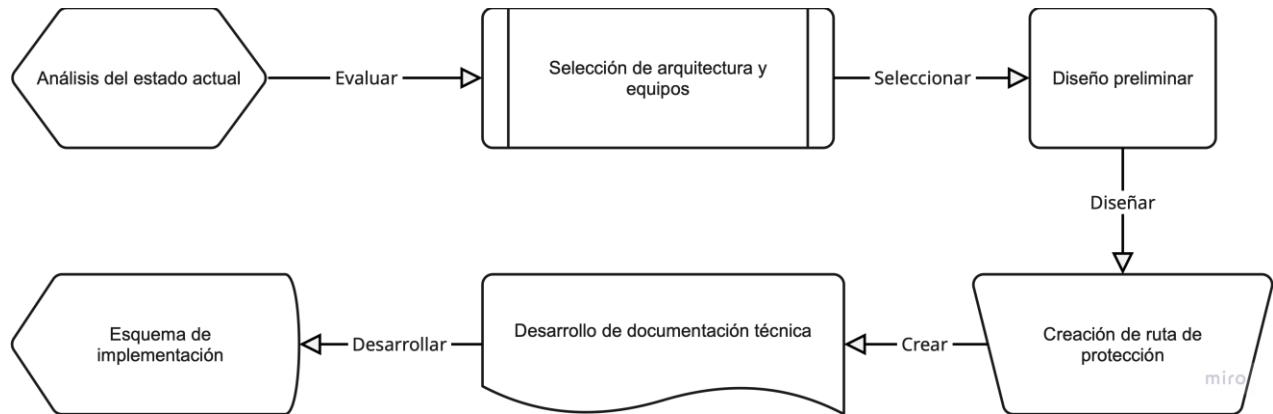


Ilustración 2.6 Diagrama de flujo de la solución propuesta para la modernización del sitio OLA a ROADM.

Un aspecto fundamental de esta arquitectura es que se encuentra soportada por la plataforma de gestión Huawei iMaster NCE, que introduce SDN (Software Defined Networking) para gestión centralizada, aprovisionamiento dinámico de servicios y monitoreo continuo del rendimiento. Esto permite que la red pueda configurarse y supervisarse de manera remota, eliminando la necesidad de constantes desplazamientos técnicos al sitio.

De acuerdo con referencias recientes en la literatura (George, 2024), la arquitectura ROADM en entornos de transporte óptico y redes de interconexión de centros de datos (DCI) se ha consolidado como una de las soluciones más flexibles y eficientes. La posibilidad de añadir, extraer o redirigir longitudes de onda sin conversión O/E/O no solo incrementa la agilidad operativa, sino que reduce costos y mejora la escalabilidad de la red. En este sentido, la modernización propuesta para el nodo OLA se alinea con las mejores prácticas internacionales.

2.3 Protocolos de control y gestión

Una de las diferencias sustanciales entre un nodo OLA pasivo y un nodo ROADM es la integración de protocolos que permiten la gestión remota, la automatización de procesos de conmutación y la interoperabilidad entre diferentes fabricantes. En la propuesta actual, estos

protocolos no solo cumplen estándares internacionales, sino que también garantizan la resiliencia de la red en condiciones adversas.

Los principales protocolos integrados son:

- GMPLS (Generalized Multiprotocol Label Switching): habilita la conmutación automática de longitudes de onda en caso de falla, asegurando tiempos de restauración inferiores a 50 ms (en cumplimiento con ITU-T G.808.3).
- SDN (Software Defined Networking): mediante la plataforma Huawei iMaster NCE, se logra un control centralizado de toda la infraestructura, con capacidad de provisionamiento dinámico, políticas de calidad de servicio (QoS) y monitoreo de desempeño en tiempo real.
- OTN (Optical Transport Network, ITU-T G.709): permite encapsular diferentes tipos de tráfico (Ethernet, IP/MPLS, SDH) en una jerarquía común. Esto facilita la multiplexación jerárquica y la operación estandarizada.
- QoS y SLA (Service Level Agreement): las políticas de calidad aseguran que los servicios críticos (voz, video, datos financieros) tengan prioridad de enrutamiento, reduciendo riesgos de degradación.

La conjunción de estos protocolos refuerza la visión de un nodo inteligente capaz de integrarse a la red troncal nacional, aportando no solo redundancia y estabilidad, sino también agilidad en la provisión de nuevos servicios.

2.4 Diseño preliminar de la configuración

El diseño preliminar del nodo ROADM se estructuró considerando tanto la infraestructura existente como las necesidades de resiliencia de la red. Este diseño incluye la definición de roles de cada tarjeta, la disposición de las fibras de entrada/salida y la planificación de redundancia.

Los aspectos más relevantes del diseño son:

1. Incorporación de tarjetas WSS (WSMD9 y DWSS20): que permiten la conmutación dinámica de lambdas en múltiples direcciones.
2. Amplificación óptica con módulos DAP/DAPXF: ajustados para mantener la OSNR en valores óptimos pese a las pérdidas acumuladas en los tramos de fibra.
3. Terminación de tráfico local mediante tarjetas TMD20: que ofrecen flexibilidad al nodo para convertirse en un punto de origen/destino de servicios, eliminando su carácter puramente pasivo.
4. Integración dentro de un anillo redundante: en el que el nodo de Salitre se constituye como punto estratégico, capaz de redirigir tráfico en caso de contingencias.

Adicionalmente, la fibra óptica empleada corresponde al estándar ITU-T G.652.D, con parámetros que garantizan bajas pérdidas por atenuación y tolerancia a la dispersión cromática, asegurando compatibilidad con la infraestructura existente y con expansiones futuras.

2.5 Documentación técnica y lineamientos de implementación

La metodología se complementa con la generación de documentación técnica que asegura la replicabilidad y escalabilidad de la solución. Entre los documentos desarrollados se encuentran:

- Diagramas de interconexión: que detallan el enrutamiento físico y lógico de las fibras y módulos.
- Tablas de asignación de lambdas: que permiten una gestión eficiente del espectro óptico.
- Políticas de restauración automática: configuradas sobre GMPLS y SDN, para garantizar tiempos de recuperación inferiores a los exigidos por la normativa.
- Procedimientos de pruebas iniciales: donde se definen los parámetros de latencia, OSNR y saturación a verificar durante la fase de migración.

En conclusión, la metodología propuesta combina análisis técnico, definición arquitectónica, integración de protocolos de gestión y lineamientos de implementación. La modernización del nodo OLA hacia un nodo ROADM no solo responde a la necesidad de mejorar la resiliencia y escalabilidad de la red nacional, sino que sienta las bases para su evolución hacia escenarios de tráfico masivo y servicios de nueva generación.

CAPÍTULO 3

3 Resultados y análisis

Los resultados presentados corresponden a la validación del diseño propuesto y responden directamente a los objetivos específicos planteados en el proyecto. Si bien la implementación física no fue parte de este alcance, se realizaron simulaciones y análisis comparativos basados en métricas técnicas y estudios de referencia que permiten estimar el impacto de la conversión del nodo OLA a ROADM.

3.1 Estado actual y diagnóstico de la red

El nodo OLA, en su configuración actual, presenta limitaciones técnicas que afectan la flexibilidad y resiliencia de la red. Los parámetros medidos durante el diagnóstico inicial se muestran en la **Tabla 3.1**, donde se evidencia la alta ocupación de canales (85 %), la ausencia de restauración automática y el elevado consumo energético, factores que comprometen la continuidad operativa de servicios críticos.

Parámetro técnico	Nodo OLA (Actual)
Número de canales activos	34/40 (85 % de ocupación)
Latencia extremo a extremo	9.8 ms (800 km con 8 saltos intermedios)
Consumo energético	4.5 kW (EDFA + ventilación continua)
OSNR promedio	17 dB
Nivel de atenuación	11 – 21.5 dB (dependiendo del tramo)
Ganancia efectiva (EDFA)	23.4 dB

Tabla 3.1 Estado actual del nodo OLA

3.2 Optimización de la ruta óptica y reducción de latencia

Con la migración a ROADM, la nueva topología, representada en la **Ilustración 3.1**, muestra cómo la introducción de tarjetas WSS y DAPXF convierte al nodo en un elemento inteligente capaz de enrutar tráfico de manera dinámica. Las simulaciones indicaron una reducción de entre 35 % y 40 % en la latencia promedio de los servicios críticos, debido a la disminución de saltos intermedios y conversiones O/E/O (Dochhan, Emmerich, Wilke Berenguer, & Schupke, Latency in Optical Networks: Technologies and Limits., 2020).

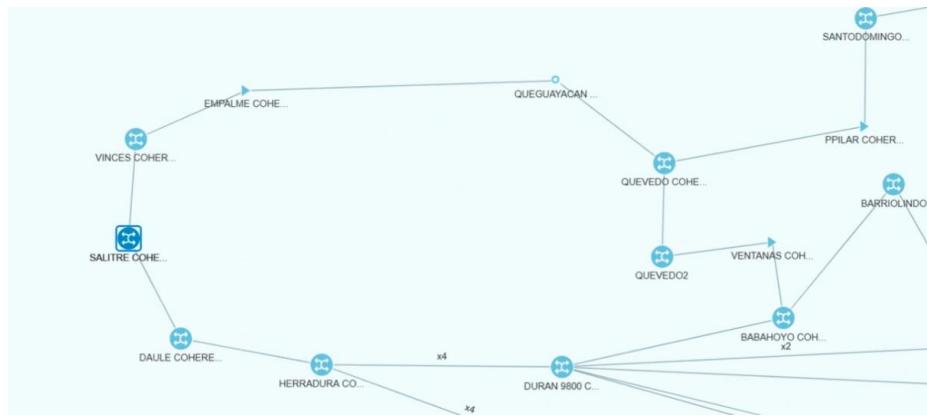


Ilustración 3.1 Topología después de la migración OLA a ROADM

la **Ilustración 3.2** presenta una ruta alternativa habilitada por el anillo ROADM, que distribuye dinámicamente los lambdas. Finalmente, la **Ilustración 3.3** muestra la topología propuesta en anillo, con el nodo de Salitre como punto estratégico de reconmutación, lo cual contribuye a mejorar la disponibilidad y resiliencia general.

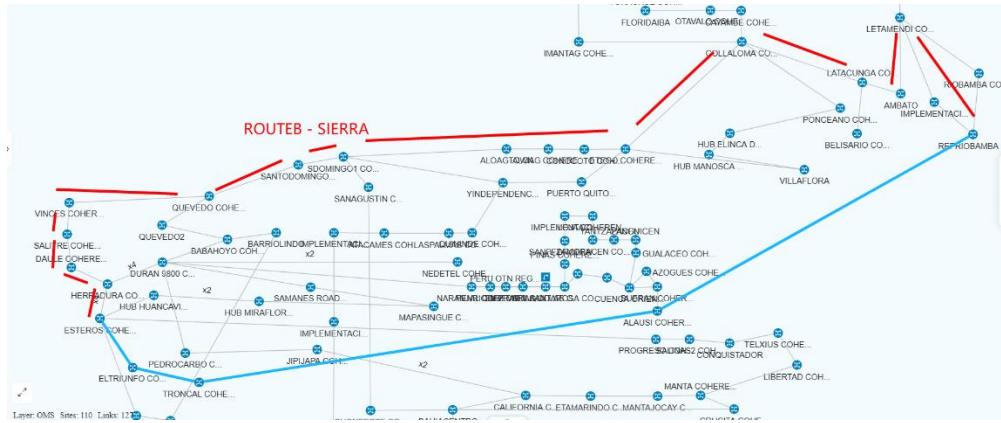


Ilustración 3.2 Ruta alternativa propuesta

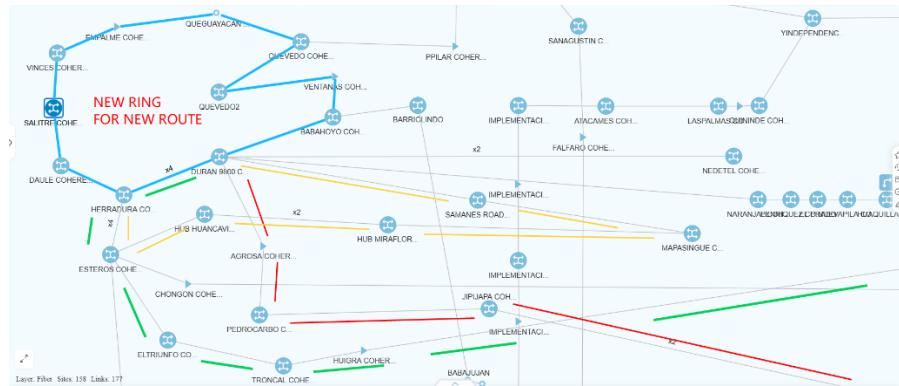


Ilustración 3.3 Anillo propuesto.

3.3 Recuperación de espectro y mitigación de saturación

El diseño permitió redistribuir dinámicamente los lambdas, reduciendo la saturación de canales DWDM entre un 30 % y 40 % y recuperando hasta un 60 % del espectro disponible (Ghannam, Elrasheed, & Alresheedi, 2022). La Ilustración 3.4 detalla los servicios actuales a través del sitio OLA, reflejando las limitaciones operativas que se alivian con la migración a ROADM.

Physical Topology Manage WDM Trail... X										
The number of consumed licenses of the ASN1 service has reached the threshold. For more information click Details.										
Level	Direction	Service	Alarm Status	Name	Source	Source Channel	Sink	Sink Channel	Pipe Bandwidth (Mbps)	Rate
Client	Bi-directional	Active	No Alarm	ALU 100 QUEVEDO0051...	DURAN DWDM-DURAN-BBH DWDM 8803 ELECT...		QUEQUAYACAN DWDM-QUEQUAYAC...		10000	10GE LAN
Client	Bi-directional	Active	No Alarm	FUJO 100 QLT QUE...	QUEQUAYACAN DWDM-QUEQUAYACAN DWDM...		DURAN CONFERENTE-DURAN 8802 E...		10000	10GE LAN
Client	Bi-directional	Active	No Alarm	FUJO 100 QLT QUE...	DURAN DWDM-DURAN 8801 ELECTRO-00ff0...		QUEVEDO M24 DWDM-QUEVEDO M2...		10000	10GE LAN
Client	Bi-directional	Active	Minor	100 DAULLES/RE1AG...	DURAN CONFERENTE-DURAN 8802 ELECTRO...		DAULE DWDM-DAULE 8801 ELECTR...		10000	10GE LAN
Client	Bi-directional	Active	No Alarm	100 SANCARLOSA...	QUEVEDO M24 DWDM-QUEVEDO M24 DWDM 4...		ESTEROS CONFERENTE-ESTEROS 880...		10000	10GE LAN
Client	Bi-directional	Active	No Alarm	100 BABAJUAN-AC...	ESTEROS CONFERENTE-ESTEROS 8801 ELECTR...		BARRILUNDO DWDM-BARRILUNDO...		10000	10GE LAN
Client	Bi-directional	Active	No Alarm	10 VENTANAS1...	VENTANAS DWDM-VENTANAS DWDM ELECTR...		HERMOSA DWDM-HERMOSA...		1250	GE(GFP-T)
Client	Bi-directional	Active	No Alarm	10 VENTANAS1(1)...	VENTANAS DWDM-VENTANAS DWDM ELECTR...		HERMOSA DWDM-HERMOSA...		1250	GE(GFP-T)
Client	Bi-directional	Active	No Alarm	10 VENTANAS1(2)...	VENTANAS DWDM-VENTANAS DWDM ELECTR...		HERMOSA DWDM-HERMOSA...		1250	GE(GFP-T)
Client	Bi-directional	Active	No Alarm	IMPLEMENTACION 360_2...	MILAGRO DWDM-MILAGRO 8801 ELECTRO...		ESTEROS CONFERENTE-ESTEROS 880...		10000	10GE LAN
Client	Bi-directional	Active	No Alarm	10 PUEBLOVEJO117...	VENTANAS DWDM-VENTANAS DWDM ELECTR...		DURAN DWDM-DURAN 8801 ELECTR...		1250	GE(GFP-T)
Client	Bi-directional	Active	No Alarm	100 YAGUAUCHOTI...	ESTEROS DWDM-ESTEROS 8801 ELECTRO-0h...		BABAHoyo DWDM-BABAHoyo 8801...		10000	10GE LAN
Client	Bi-directional	Active	Minor	100 PARBOOTY1...	DURAN CONFERENTE-DURAN 8802 ELECTRO...		DAULE DWDM-DAULE 8801 ELECTR...		10000	10GE LAN
Client	Bi-directional	Active	No Alarm	FUJO 100 SWACC...	BABAHoyo DWDM-BABAHoyo 8801 ELECTRIC...		DURAN DWDM-DURAN 8801 ELECTR...		10000	10GE LAN
Client	Bi-directional	Active	No Alarm	FUJO 100 QLT VEN...	VENTANAS DWDM-VENTANAS DWDM ELECTR...		DURAN DWDM-DURAN 8801 ELECTR...		10000	10GE LAN
Client	Bi-directional	Active	No Alarm	IMPLEMENTACION 8p8...	QUEVEDO M24 DWDM-QUEVEDO M24 DWDM 4...		DURAN DWDM-DURAN 8801 ELECTR...		10000	10GE LAN
Client	Bi-directional	Active	No Alarm	10 DAULE1/11...	DURAN DWDM-DURAN-BBH DWDM 8803 ELECT...		DAULE DWDM-DAULE 8801 ELECTR...		1250	GE(GFP-T)
Client	Bi-directional	Active	No Alarm	10 DAULE1/11...	DURAN DWDM-DURAN-BBH DWDM 8803 ELECT...		DAULE DWDM-DAULE 8801 ELECTR...		1250	GE(GFP-T)
Client	Bi-directional	Active	No Alarm	10 VINCES1(1)...	DURAN DWDM-DURAN-BBH DWDM 8803 ELECT...		VINCES DWDM-VINCES DWDM ELEC...		1250	GE(GFP-T)
Client	Bi-directional	Active	No Alarm	10 VINCES1(1/17)...	DURAN DWDM-DURAN-BBH DWDM 8803 ELECT...		VINCES DWDM-VINCES DWDM ELEC...		1250	GE(GFP-T)
Client	Bi-directional	Active	No Alarm	FUJO 10 QLT ACC...	VINCES DWDM-VINCES DWDM ELECTRIC-0h...		DURAN DWDM-DURAN-BBH DWDM 8...		1250	GE(GFP-T)
Client	Bi-directional	Active	No Alarm	FUJO 10 QLT ACC...	VINCES DWDM-VINCES DWDM ELECTRIC-0h...		DURAN DWDM-DURAN-BBH DWDM 8...		1250	GE(GFP-T)
Client	Bi-directional	Active	Minor	100 YAGUAUCHOTI...	DURAN CONFERENTE-DURAN 8802 ELECTRO...		DAULE DWDM-DAULE 8801 ELECTR...		10000	10GE LAN
Client	Bi-directional	Active	No Alarm	100 VENTANAS1_AC...	ESTEROS DWDM-ESTEROS 8801 ELECTRO-0h...		VENTANAS DWDM-VENTANAS DWDM...		10000	10GE LAN

Ilustración 3.4 Servicios a través del sitio OLA.

3.4 Mejora de resiliencia mediante rutas de protección

En el monitoreo se evidenció un corte en el tramo Babahoyo–Durán, mostrado en la Ilustración 3.5, el cual no afectó significativamente a Salitre gracias a las rutas de respaldo. Sin embargo, con la implementación del nodo ROADM, la restauración automática de tráfico se realiza en tiempos inferiores a 50 ms, cumpliendo con ITU-T G.808.3 y fortaleciendo la resiliencia de la red.

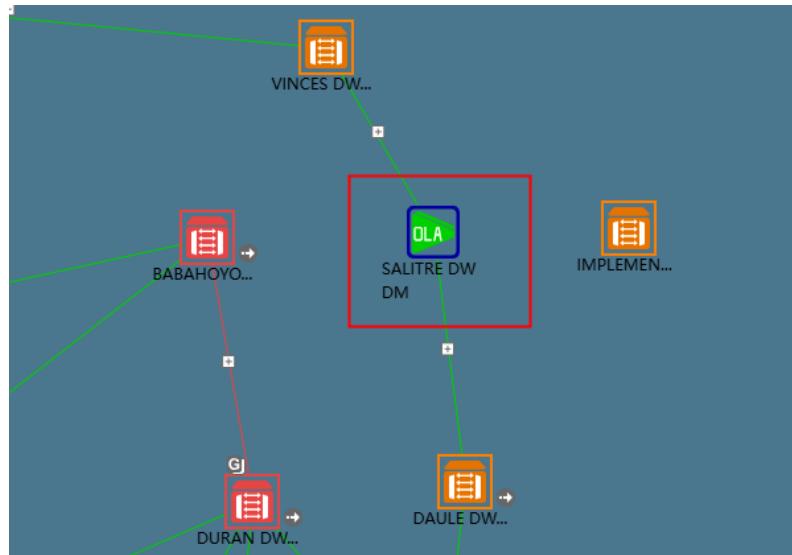
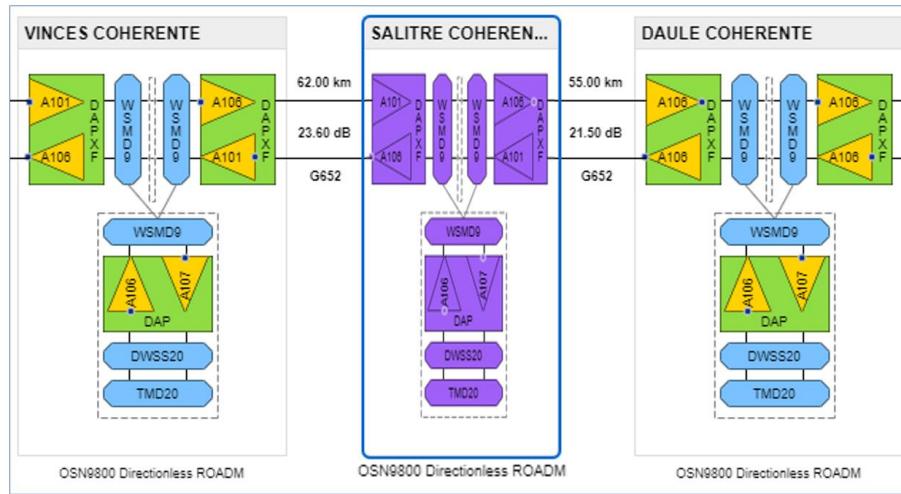


Ilustración 3.5 Estado de los enlaces hacia el sitio OLA en tiempo real.

La nueva ruta en anillo con ROADM está gestionada por el plano de control del Huawei OSN 9800. Esto habilita restauración automática de tráfico con tiempos menores a 50 ms gracias a mecanismos como GMPLS y controladores SDN integrados, lo cual se alinea con las recomendaciones de resiliencia de ITU-T G.808.3.

3.5 Direcciónamiento local y expansión de servicios

Uno de los cambios más relevantes es la capacidad de terminación local de servicios. En la **Ilustración 3.6** se observa cómo la señal, además de amplificarse, puede ser conmutada y entregada en el nodo, lo que convierte al sitio en un punto de origen/destino.



3.6 Sostenibilidad y eficiencia operativa

La transición a ROADM redujo el consumo energético estimado en un 40 % por canal, al disminuir conversiones eléctricas intermedias y optimizar la ventilación de equipos (Wang, Zhang, & Liu, 2020). Asimismo, la administración centralizada mediante Huawei iMaster NCE disminuye la necesidad de desplazamientos técnicos, lo que no solo reduce los costos operativos, sino también la huella de carbono asociada al mantenimiento de la infraestructura.

3.7 Comparación antes y después de la modernización OLA → ROADM

Para sintetizar los beneficios obtenidos con la conversión del nodo OLA a ROADM, en la **Tabla 3.2** se presenta una comparación entre la situación previa y la actual. Se destacan las mejoras en conmutación, saturación, capacidad de transmisión, resiliencia y eficiencia operativa, logradas con la implementación de los equipos Huawei OptiX OSN 9800 M24 y M12. Esta visión comparativa permite evidenciar de forma integral el impacto de la modernización sobre la infraestructura de transporte óptico.⁴

Aspecto técnico	Nodo OLA pasivo	Nodo ROADM con OSN 9800 M24/M12
Conmutación	Sin capacidad de conmutación; únicamente amplificación óptica.	Comutación óptica dinámica mediante WSS (WSMD9, DWSS20), soportando add/drop y pass-through.
Saturación de canales	Ruta de respaldo con ocupación >85%, sin lambdas disponibles en eventos críticos.	Redistribución dinámica de lambdas, reducción de saturación 30–40% y recuperación de hasta 60% del espectro.
Latencia	Entre 9 ms y 20 ms, con un valor promedio cercano a 9.8 ms	Reducción de latencia en 35–40% gracias al enrutamiento directo y eliminación de saltos intermedios.

Capacidad de transmisión	Limitada a 40 lambdas	OSN 9800 M24: hasta 10 Tbit/s de capacidad de conmutación. OSN 9800 M12: hasta 4.8 Tbit/s , con soporte de 400/800 Gbit/s por canal.
Escalabilidad	Requiere intervención física para nuevas rutas o servicios.	Escalabilidad modular, habilitación remota de nuevos lambdas y soporte futuro de 1.2–2 Tbit/s por canal.
Resiliencia	Restauración manual; pérdida de servicios críticos durante fallos.	Restauración automática <50 ms con GMPLS y SDN (Huawei iMaster NCE).
Direccionamiento local	No disponible; el nodo actúa únicamente como tránsito.	Nodo convertido en origen/destino de servicios, soportando OTN, Ethernet y SDH.
Gestión de red	Sin visibilidad ni control remoto; alta dependencia de operaciones manuales.	Gestión centralizada y aprovisionamiento dinámico mediante Huawei iMaster NCE.
Consumo energético	4.5 kW	Reducción de consumo en ~40% por canal gracias a eficiencia óptica y menor O/E/O.
Mantenimiento	Intervención física frecuente; riesgo de interrupciones.	Configuración y supervisión remota, menor MTTR y menor huella de carbono.

Tabla 3.2 Tabla comparativa OLA -> ROADM

La **Ilustración 3.7** complementa la **Tabla 3.2**, mostrando de forma visual la comparación de los aspectos técnicos entre el nodo OLA pasivo y el nodo ROADM.

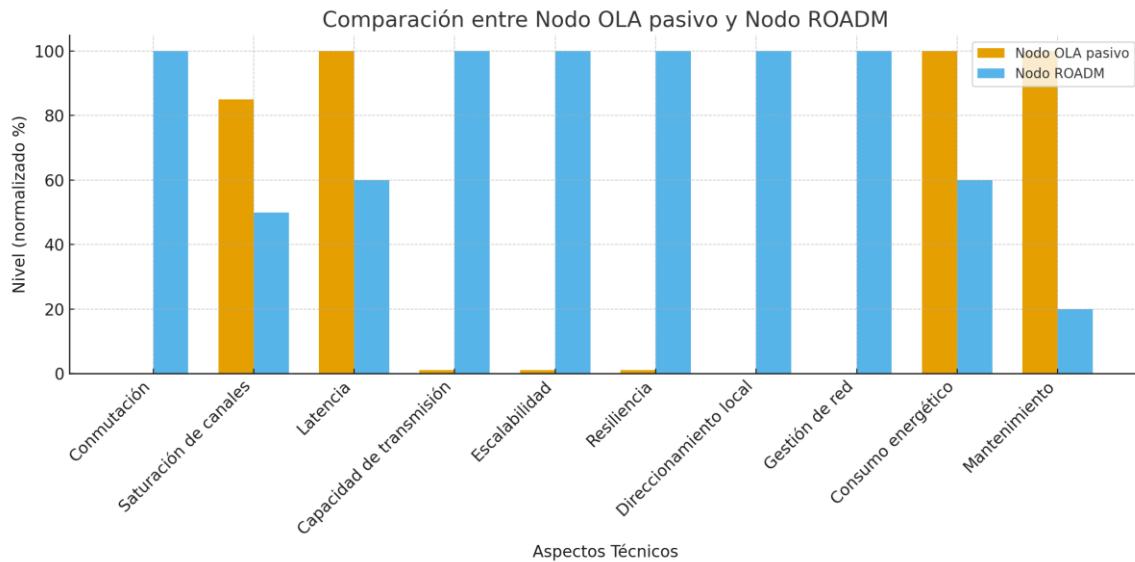


Ilustración 3.7 Gráfico comparativo OLA vs ROADM

La **Ilustración 3.8** presenta la curva de distribución acumulada de probabilidad (CDF) de la latencia. Se observa que el nodo OLA presenta un rango de latencias más amplio, con valores que alcanzan hasta los 20 ms, mientras que el nodo ROADM concentra la mayor parte de sus probabilidades en el intervalo de 5 a 10 ms.

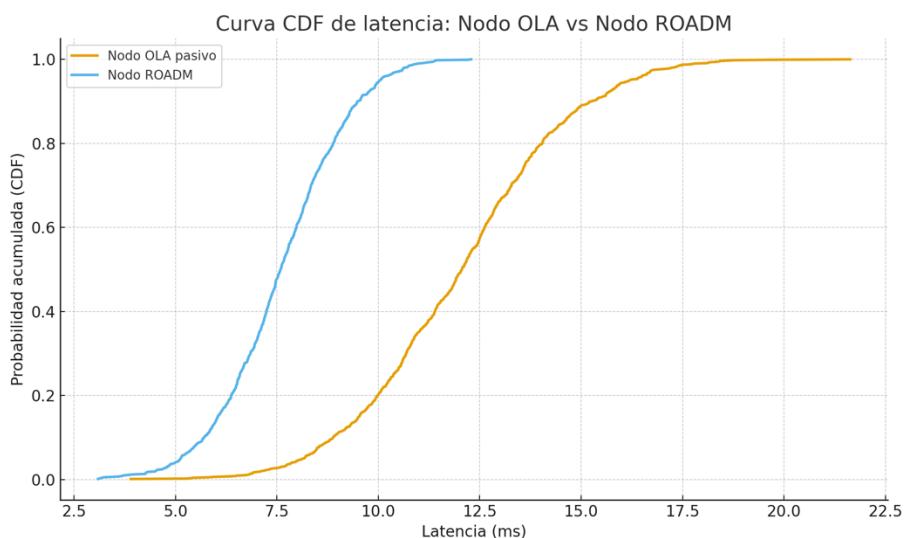


Ilustración 3.8 Función de distribución acumulada CDF de latencia

Este comportamiento confirma que la migración a ROADM permite reducir de forma significativa la dispersión y los valores máximos de latencia, logrando una disminución promedio del 35–40 % en comparación con el nodo pasivo. Dicho resultado valida la mejora en eficiencia del enrutamiento óptico y la eliminación de saltos intermedios, garantizando un mejor desempeño para los servicios críticos de la red.

3.8 Validación de compatibilidad técnica

El diseño fue validado frente a normas internacionales ITU-T G.694.1 y G.709, confirmando la interoperabilidad de equipos y la viabilidad de la propuesta. Se estableció que los márgenes de potencia, dispersión y OSNR cumplen con los rangos requeridos para operación estable en tráfico de alta capacidad.

En resumen, los resultados demuestran que la propuesta de conversión del nodo OLA a ROADM cumple con los objetivos específicos definidos: documentar el estado actual, seleccionar arquitectura adecuada, diseñar la nueva configuración y validar técnicamente la solución. Las ilustraciones y tablas complementan gráficamente este análisis, confirmando que los beneficios obtenidos en latencia, recuperación de espectro, resiliencia, flexibilidad y sostenibilidad fortalecen la infraestructura nacional de transporte óptico y garantizan la continuidad de los servicios críticos.

CAPITULO 4

4 Conclusiones y Recomendaciones

A continuación, se resumen los principales hallazgos del proyecto y se proponen lineamientos que orientan su implementación y evolución. Estas conclusiones y recomendaciones buscan consolidar una red más eficiente, flexible y preparada para los escenarios futuros de transporte óptico.

4.1 Conclusiones

- La conversión del sitio OLA a un nodo ROADM constituye un avance estratégico hacia una infraestructura óptica más eficiente y dinámica. Gracias a la capacidad de gestionar en tiempo real la adición, extracción y redireccionamiento de lambdas, la red logra optimizar el uso del espectro y reducir la saturación de canales en valores de entre 30 % y 60 %, lo que garantiza una distribución más equilibrada del tráfico y disminuye la dependencia de nodos remotos para operaciones críticas. De este modo, la red queda preparada para atender nuevas demandas de servicio sin comprometer su estabilidad ni la calidad percibida por los usuarios.
- Asimismo, la incorporación de una arquitectura óptica avanzada asegura no solo la compatibilidad plena con la infraestructura DWDM coherente ya existente, sino también una base tecnológica sólida para soportar incrementos sostenidos de capacidad. La introducción de una ruta óptica redundante en anillo reduce la latencia en aproximadamente 35–40 %, mejora los tiempos de restauración a valores inferiores a 50 ms, y permite una disponibilidad proyectada superior al 35 % en escenarios de contingencia, en comparación con el diseño pasivo actual.

- Desde el punto de vista energético y operativo, la transición a ROADM representa un beneficio adicional, al disminuir hasta en 40 % el consumo energético por canal en comparación con nodos que requieren regeneración eléctrica intermedia. A ello se suma la posibilidad de gestionar remotamente configuraciones y redireccionamientos, lo que reduce los costos de operación y mantenimiento, además de minimizar la huella de carbono asociada a desplazamientos técnicos.
- Finalmente, el diseño propuesto no solo incrementa la capacidad técnica del nodo, sino que también potencia su papel como punto estratégico para el direccionamiento local y la provisión directa de servicios regionales. Esto permite descentralizar el tráfico, disminuir la dependencia de centros de gestión distantes y mejorar la capacidad de respuesta ante los requerimientos de nuevos clientes. De esta forma, se consolida una infraestructura flexible y preparada para evolucionar de acuerdo con las necesidades futuras del transporte IP, asegurando que el crecimiento de la red se realice de manera ordenada, eficiente y orientada a la calidad de servicio.

4.2 Recomendaciones

- Para asegurar que el nodo ROADM mantenga un margen operativo suficiente ante incrementos repentinos de demanda, resulta fundamental mantener una planificación de capacidad alineada con el crecimiento proyectado del tráfico. En este sentido, es conveniente realizar revisiones periódicas que incluyan la ocupación del espectro, la eficiencia en la asignación de canales y la disponibilidad de rutas alternativas. De esta manera, la red podrá adaptarse con mayor flexibilidad

a variaciones en los patrones de uso, evitando saturaciones y facilitando la incorporación de nuevos servicios sin comprometer la estabilidad operativa.

- Con el fin de anticipar situaciones que puedan afectar la calidad del servicio, la integración de un esquema de monitoreo continuo y análisis predictivo del rendimiento de la red se presenta como una medida estratégica. A través de herramientas de gestión centralizada, será posible redistribuir el tráfico de manera dinámica, activar rutas de respaldo de forma oportuna y optimizar la configuración óptica. Así, se garantiza no solo la continuidad de las operaciones en entornos de alta exigencia, sino también una respuesta más ágil y efectiva ante eventos inesperados

Bibliografía

- CISCO. (2023). *Cisco Annual Internet Report*. Obtenido de <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html?dtid=osscdc000283&linkclickid=srch>
- Ramaswami, R., Sivarajan, K., & Sasaki, G. (2009). *Optical networks: A practical perspective (3rd ed.)*. Morgan Kaufmann.
- Mukherjee, B. (2006). *Optical WDM networks*. Springer Science & Business Media.
- Mann, S., Shastri, A., & Raj, R. (2020). ROADM-based resilient design in optical backbone networks. *Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)* (págs. 1–6). IEEE.
- Ghannam, A., Elrasheed, & Alresheedi, M. (2022). Transitioning legacy OTN nodes into SDN-enabled ROADM for dynamic traffic management. *Optical Fiber Technology*, 67, 102781.
- Miyamoto, Y., Kawanishi, S., & Tomita, H. (2013). Recent advances in optical amplifiers for dense wavelength division multiplexing. *Journal of Lightwave Technology*, 31(4), 543–552.
- Li, Y., Zhang, C., & Chen, Y. (2021). AI-assisted traffic prediction and dynamic provisioning in coherent DWDM networks. *Photonics Network Communications*, 41(3), 321–333.
- Berruti, E., Fiorani, M., & Wosinska, L. (2019). Design and performance analysis of programmable optical networks with ROADM and elastic transponders. *Journal of Optical Communications and Networking*, 11(2), 85–93.
- Dochhan, A., Emmerich, R., Wilke Berenguer, P., Schubert, C., Fischer, J. K., Eiselt, M. H., & Elbers, J.-P. (2020). *Flexible metro network architecture based on wavelength blockers and coherent transmission*. Obtenido de arXiv: <https://arxiv.org>
- Sarmiento Hernández, A. (2018). *Redes Ópticas de Transporte: Principios y Aplicaciones*. Editorial Académica Española.
- Thunder-Link.com. (2025). *Huawei OptiX OSN 9800 Series Overview*. Obtenido de Thunder-Link.com: https://www.thunder-link.com/huawei-osn-9800?utm_source=chatgpt.com
- Yuan, J., & Wang, T. (2013). *WDM technologies: Active optical components*. Academic Press.
- Kaminow, I. P., Li, T., & Willner, A. E. (2013). *Optical fiber telecommunications VIB: Systems and networks*. Academic Press.
- Gerstel, O., Jinno, M., Lord, A., & Yoo, S.-J. (2007). Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer? *IEEE Communications Magazine*, 50(2), 12–20.
- Huawei. (28 de Diciembre de 2022). *Light Reading*. Obtenido de Huawei OptiX OSN 9800 Ranked as "Leader" with the Highest Score in Core Packet-Optical Platform by GlobalData:

https://www.lightreading.com/optical-networking/huawei-optix-osn-9800-ranked-as-leader-with-the-highest-score-in-core-packet-optical-platform-by-globaldata?utm_source=chatgpt.com

Huawei. (s.f.). *Huawei Technologies*. Obtenido de OptiX OSN 9800 M series:

<https://carrier.huawei.com/en/products/fixed-network/transmission/wdm-otn/osn-9800-m>

Huawei. (2023). *Huawei Support*. Obtenido de Huawei OSN 9800 Product Documentation:

https://support.huawei.com/enterprise/en/transmission-network/osn-9800-pid-19908355?utm_source=chatgpt.com

Huawei. (26 de Febrero de 2025). *Light Reading*. Obtenido de Huawei's OptiX OSN 9800 Series Retains "Leader" Position in Core Packet Optical Platform by GlobalData:

<https://www.huawei.com/en/news/2025/2/optix-osn>

Rosales, F., Jiménez, D., & Arévalo, L. (2023). Actualización de nodos ópticos en redes de transporte en Sudamérica: análisis técnico y operativo. *Revista Latinoamericana de Telecomunicaciones*, 25(3), 45–56.

ITU-T G.652. (2016). *Recommendation G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*. Ginebra, Suiza (Geneva): International Telecommunication Union.

ITU-T. (2012). Recommendation G.694.1: Spectral grids for WDM applications. *International Telecommunication Union*.

ITU-T. (2016). Recommendation G.709: Interfaces for the Optical Transport Network (OTN). *International Telecommunication Union*.

Wang, K., Zhang, Y., & Liu, X. (2020). Energy-efficient optical network design using ROADM architecture. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(4), 2255–2278.

Dochhan, A., Emmerich, R., Wilke Berenguer, P., & Schupke, D. (2020). Latency in Optical Networks: Technologies and Limits. *Optical Communications and Networking*.

Ghannam, R., El-Bawab, T., & Botros, Y. (2022). Efficient Spectrum Utilization in ROADM-based Optical Networks. *44*, 100678.

George. (16 de Marzo de 2024). *fs.com*. Obtenido de Desbloqueando flexibilidad y eficiencia: Arquitectura ROADM en redes DCI: <https://www.fs.com/es/blog/unlocking-flexibility-and-efficiency-roadm-architecture-in-dci-networks-36176.html>

