

UNIVERSIDAD ADOLFO IBÁÑEZ

TESIS DE MAGÍSTER

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE REDES ÓPTICAS
TRANSPARENTES CON MULTI-BANDA: EONS
EN C+L VS. FIXED-GRID EN C+L+E/S**

Autor:
Mirko Zitkovich Fuentes

Profesores guía:
Danilo Bórquez Paredes
Gabriel Saavedra Mondaca

Comité de defensa:
Miguel Carrasco Zambrano
Ariel Leiva López

*Tesis realizada acorde a los requerimientos para el grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Tecnologías de la Información
de la*

Facultad de Ingeniería y Ciencias

23 de diciembre de 2024

UNIVERSIDAD ADOLFO IBÁÑEZ

Resumen

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Tecnologías de la Información

ANÁLISIS COMPARATIVO DE REDES ÓPTICAS TRANSPARENTES CON MULTI-BANDA: EONS EN C+L VS. FIXED-GRID EN C+L+E/S

por Mirko Zitkovich Fuentes

La evolución de las redes ópticas ha permitido un aumento significativo en la capacidad de transmisión de datos en las últimas décadas. Sin embargo, el crecimiento exponencial de la demanda de ancho de banda plantea nuevos desafíos, amenazando con un inminente “capacity crunch” si no se adoptan soluciones tecnológicas innovadoras. En este contexto, las redes Multi-Banda (MB) y las Redes Ópticas Elásticas (EONs) emergen como alternativas prometedoras para abordar este desafío.

Aunque estudios previos han demostrado la superioridad de las redes MB con configuración C+L sobre las EONs en banda C, el siguiente paso en la evolución de las redes ópticas es aún una interrogante. La literatura académica sugiere que las bandas E y S son las candidatas más prometedoras para extender la capacidad de MB después de la banda L. Sin embargo, las EONs en configuración C+L emergen como una alternativa potencialmente viable. Ante este panorama, surge la pregunta: ¿Es más beneficioso adoptar EONs en una configuración C+L o continuar expandiendo MB añadiendo las bandas E o S?

Esta tesis presenta un análisis comparativo entre MB en una configuración extendida C+L+S/E y MB-EONs en C+L, buscando responder a esta interrogante. El estudio se centra en evaluar el rendimiento de ambos enfoques en términos de probabilidad de bloqueo y capacidad de red, bajo escenarios de tráfico dinámico e incremental en diversas topologías. Los resultados obtenidos mediante simulaciones revelan que la configuración MB extendida permite un rendimiento superior en todos los escenarios de manera consistente. No obstante, la elección óptima de la banda a expandir varía en función de las características topológicas de la red.

A pesar de la superioridad general de MB, el uso de EONs demostró un rendimiento competitivo, logrando incrementos de capacidad de hasta 110 % en tráfico incremental. En topologías de larga distancia, los resultados sugieren que después de incorporar la banda S, las EONs podrían constituir una alternativa más viable que continuar expandiendo MB. Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar las características específicas de la red al seleccionar estrategias de expansión y establecen una base para futuras investigaciones en el desarrollo de redes ópticas preparadas para las crecientes demandas de tráfico.

Palabras clave: fibra óptica, redes ópticas elásticas, multi-banda, capacity crunch, probabilidad de bloqueo, capacidad de red

UNIVERSIDAD ADOLFO IBÁÑEZ

Abstract

Faculty of Engineering and Science

Master of Science in Engineering, Concentration in Information Technology

COMPARATIVE ANALYSIS OF TRANSPARENT OPTICAL NETWORKS WITH MULTI-BAND: EONS IN C+L VS. FIXED-GRID IN C+L+E/S

by Mirko Zitkovich Fuentes

The optical networks evolution has enabled a significant increase in data transmission capacity over recent decades. However, the exponential growth in bandwidth demand presents new challenges, threatening an imminent “capacity crunch” if innovative technological solutions are not adopted. In this context, Multi-Band (MB) networks and Elastic Optical Networks (EONs) emerge as promising alternatives to address this challenge.

Although previous studies have demonstrated the superiority of MB networks with C+L configuration over C-band EONs, the next step in optical network evolution remains uncertain. Academic literature suggests that E and S bands are the most promising candidates for extending MB capacity beyond the L band. However, C+L EONs emerge as a potentially viable alternative. This raises the question: Is adopting EONs in a C+L configuration more beneficial or to continue expanding MB by adding E or S bands?

To address this question, this thesis presents a comparative analysis between MB in an extended C+L+S/E configuration and MB-EONs in a C+L configuration. The study evaluates the performance of both approaches in terms of blocking probability and network capacity under dynamic and incremental traffic scenarios across various topologies. Simulation results reveal that the extended MB configuration consistently delivers superior performance across all scenarios. However, the optimal choice of expansion band varies depending on the network’s topological characteristics.

Despite MB’s general superiority, EONs demonstrated competitive performance, achieving capacity increases of up to 110 % in incremental traffic scenarios. In long-distance topologies, the results suggest that after incorporating the S band, EONs might constitute a more viable alternative than continuing MB expansion. These findings emphasize the importance of considering network-specific characteristics when selecting expansion strategies and establish a foundation for future research in developing optical networks prepared for growing traffic demands.

Keywords: optical fiber, elastic optical networks, multi-band, capacity crunch, blocking probability, network capacity

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
1. Introducción	1
1.1. Redes de Telecomunicaciones	1
1.2. Aumento de la demanda de tráfico	1
1.3. Breve evolución de las telecomunicaciones	4
1.3.1. Previo a la fibra óptica	4
1.3.2. Fibra Óptica	4
1.3.3. Redes Ópticas	4
1.3.4. Time-Division Multiplexing	5
1.3.5. Wavelength-Division Multiplexing	5
1.3.6. Redes Ópticas Transparentes	6
1.3.7. Dense Wavelength-Division Multiplexing	6
1.3.8. Actualidad	7
1.4. Capacity Crunch	7
1.4.1. Soluciones prometedoras	8
1.4.2. Direcciones futuras y oportunidad	11
2. Marco Teórico	12
2.1. Estructura de una red óptica	12
2.1.1. División jerárquica	12
2.1.2. Componentes básicos	13
2.2. Despliegue de tecnologías	14
2.3. Transmisión en el espectro óptico	14
2.3.1. Componentes ópticos y electrónicos	16
2.4. Establecimiento de una conexión	18
2.4.1. Lightpath	18
2.4.2. Calidad de transmisión	18
2.4.3. Formato de modulación	18
2.4.4. Bit Rate	19
2.5. Planificación de una red	19
2.5.1. Tipos de tráfico	19
2.5.2. Asignación de recursos	20
2.6. Métricas de evaluación de una red	20
2.6.1. Probabilidad de Bloqueo	20
2.6.2. Capacidad de la Red	21

3. Definición del Problema	22
3.1. El desafío del Capacity Crunch	22
3.2. Despliegue de más fibra como solución	23
3.3. Tendencias tecnológicas actuales	24
3.4. Desafíos en Multi-Banda	24
3.4.1. Deterioro en la Calidad de Transmisión	25
3.4.2. Hardware en Multi-Banda	27
3.4.3. Asignación de Recursos en Multi-Banda	27
3.5. Desafíos en EONs	27
3.5.1. Asignación de recursos en EONs	28
3.5.2. Hardware en EONs	30
3.6. Necesidad de investigación	31
4. Estado del Arte	32
4.1. Avances en tecnologías Multi-Banda	32
4.1.1. Innovaciones en hardware	32
4.1.2. Estrategias de implementación	33
4.1.3. Asignación de recursos	34
4.2. Avances en tecnologías EONs	35
4.2.1. Innovaciones en hardware	35
4.2.2. Actualización de la red hacia EON	36
4.2.3. Avances en la asignación de recursos y la fragmentación	36
4.3. Integración entre MB y EONs	38
4.4. Brecha de investigación	38
5. Hipótesis y objetivos	40
5.1. Hipótesis	40
5.2. Objetivos	40
5.2.1. Objetivo General	40
5.2.2. Objetivos Específicos	40
6. Metodología	41
6.1. Diseño experimental	41
6.2. Topologías	42
6.2.1. Componentes ópticos de la red	44
6.3. Canales de transmisión	44
6.4. Perfiles de Tráfico	45
6.4.1. Tipo de Tráfico	45
6.4.2. Selección de Bit Rates y Formatos de Modulación	45
6.4.3. Distancias de transmisión	46
6.4.4. Definición de cargas de tráfico	47
6.5. Algoritmos de Asignación de Recursos	47
6.5.1. First-Fit	50
6.5.2. Best-Fit	51
6.5.3. Orden de las Bandas	52
6.6. Métricas	53
6.6.1. Probabilidad de Bloqueo de Ancho de Banda	53
6.6.2. Throughput de la Red	54
6.7. Software de Simulación	55
6.7.1. Configuración de la demanda de tráfico	55
6.7.2. Configuración de las topologías de red	55

6.7.3.	Programación de los algoritmos de asignación y métricas	56
6.7.4.	Variables aleatorias	56
6.7.5.	Ejecución de la biblioteca	56
6.7.6.	Hardware de simulación	57
6.8.	Parámetros generales	57
6.9.	Análisis estadístico	57
6.10.	Resumen de los escenarios	58
7.	Resultados y análisis	59
7.1.	Probabilidad de Bloqueo	59
7.2.	Probabilidad de Bloqueo de Ancho de Banda	63
7.3.	Análisis de capacidad	65
7.3.1.	Conexiones establecidas	66
7.3.2.	Conexiones establecidas por banda	67
7.3.3.	Throughput de la red	68
7.3.4.	Throughput por banda	69
8.	Conclusiones	70
A.	Archivo JSON de la demanda de tráfico	72
B.	Archivo JSON de topología de red	73
C.	Código de algoritmo de asignación de recursos en C++	74
D.	Acceso a Datos y Código	75

Índice de figuras

1.1. Crecimiento global de usuarios de Internet entre los años 2005 y 2023 [9].	2
1.2. Evolución del uso de ancho de banda por región entre 2017-2022 [10].	3
1.3. Sistema TDM con MUX y DEMUX temporales.	5
1.4. Sistema WDM con MUX y DEMUX ópticos.	6
1.5. Comparación de esquemas Fixed-Grid y Flex-Grid [42].	10
1.6. Comparativa de los Principios de Fixed-Grid, Flex-Rate y EONs.	10
2.1. Jerarquía geográfica de una red óptica [1].	13
2.2. Componentes básicos de una red [1].	13
2.3. Evolución temporal de costos de la implementación de WDM por nodo en la red [1].	14
2.4. Espectro de radiación electromagnética [45].	15
2.5. Atenuación en función de la longitud de onda y frecuencia [47].	16
2.6. Transpondedor WDM [15].	17
2.7. Representación de una red óptica con amplificadores [1].	17
3.1. Bandas de transmisión y su respectiva atenuación (dB/km) [51].	25
3.2. Esquema simplificado que muestra la transferencia de potencia entre señales ópticas de diferentes longitudes de onda [47].	26
3.3. Red con 8 nodos, 13 enlaces de fibra bidireccionales, y cada enlace con 6 FSUs, representando tres escenarios distintos de intento de conexión entre los nodos F y C.	29
3.4. Representación Gráfica de la Fragmentación y su Impacto en la Asignación de Conexiones.	30
6.1. Resumen de la metodología aplicada.	41
6.2. Topología de la National Science Foundation Network.	42
6.3. Topología de la United Kingdom Network.	43
6.4. Topología de la European Core Network.	43
6.5. Diagrama de flujo del proceso de asignación de recursos.	49
7.1. Probabilidad de bloqueo por topología con bandas C+L.	60
7.2. Probabilidad de bloqueo por topología con bandas C+L+S/E.	61
7.3. Mejores valores de BP por topología.	62
7.4. Probabilidad de bloqueo de ancho de banda por topología con bandas C+L.	64
7.5. Probabilidad de bloqueo de ancho de banda por topología con bandas C+L+S/E.	64
7.6. Mejores valores de BBP por topología.	65
7.7. Cantidad de conexiones asignadas por escenario en diferentes topologías antes de alcanzar un umbral de BP de 10 %.	66
7.8. Cantidad de conexiones asignadas por banda utilizando FF por topología antes de alcanzar un umbral de BP de 10 %.	67

7.9. Throughput por escenario en diferentes topologías antes de alcanzar un umbral de BP de 10 %.	68
7.10. Throughput por banda utilizando FF por topología antes de alcanzar un umbral de BP de 10 %.	69

Índice de tablas

2.1. Parámetros de las bandas de transmisión óptica [33], [47].	15
3.1. Peor caso de GSNR (dB) por banda en un enlace de 960 km con spans de 80 km, evaluado en distintos escenarios [31].	26
3.2. Tipos de amplificación y materiales dopantes para el rango de bandas de transmisión desde O hasta L [67].	27
6.1. Parámetros de las topologías de red utilizadas.	43
6.2. Cantidad de canales por banda con espaciados de 6,25 GHz, 12,5 GHz y 50 GHz [103].	44
6.3. Cantidad total de ancho de banda por escenario	44
6.4. Consumo espectral en función del Bit Rate para diferentes formatos de modulación [33].	45
6.5. Distancia máxima por banda para diferentes formatos de modulación (en spans $\times 100$ km) [103].	46
6.6. Cargas de tráfico simuladas para cada topología.	47
6.7. Orden de priorización de bandas por escenario	53
6.8. Escenarios de simulación por topología	58

Lista de Abreviaciones

BBP	B andwidth B locking P robability (Probabilidad de Bloqueo de Ancho de Banda)
BP	B locking P robability (Probabilidad de Bloqueo)
DFA	D oped F iber A mplifier (Amplificador de Fibra Dopada)
DWDM	D ense- W avelength D ivision M ultiplexing
EDFA	E rbium- D oped F iber A mplifier (Amplificador de Fibra Dopada con Erbio)
EON	E lastic O ptical N etworks (Redes Ópticas Elásticas)
EuroCore	E uropean C ore N etwork
FM	F ormato de M odulación
FSU	F requency S lot U nit
GSNR	G eneralized S ignal-to- N oise R atio
IA	I nteligencia A rtificial
ISP	I nternet S ervice P rovider (Proveedor de Servicios de Internet)
ITU-T	I nternational T elecommunication U nion T elecommunication S tandardization S ector (Unión Internacional de Telecomunicaciones)
LWDM	L AN W avelength- D ivision M ultiplexing
MB	M ulti- B and (Multi-Banda)
MF	M ulti- F iber (Multi-Fibra)
ML	M achine L earning
MWDM	M edium W avelength- D ivision M ultiplexing
NSFNet	N ational S cience F oundation N etwork
OFDM	O rthogonal F requency- D ivision M ultiplexing
QoT	Q uality of T ransmission (Calidad de Transmisión)
QoT-E	Q uality of T ransmission E stimator (Estimador de Calidad de Transmisión)
QoS	Q uality of S ervice (Calidad de Servicio)
RCSA	R outing, C ore and S pectrum A ssignment
RMLBSA	R outing, M odulation L evel, B and and S pectrum A ssignment
RMLSA	R outing, M odulation and S pectrum A ssignment
RMSA	R outing, M ode and S pectrum A ssignment
RSA	R outing and S pectrum A ssignment
RWA	R outing and W avelength A ssignment
RBWA	R outing, B and and W avelength A ssignment
SDM	S pace- D ivision M ultiplexing
TDM	T ime- D ivision M ultiplexing
UKNet	U nited K ingdom N etwork
WDM	W avelength- D ivision M ultiplexing

Capítulo 1

Introducción

1.1. Redes de Telecomunicaciones

En el ámbito de las telecomunicaciones la función de una red es, en esencia, bastante simple: establecer comunicación entre dos puntos. Sin embargo, existen múltiples grados de libertad y toma de decisiones en su operación, incluyendo su estructura, la gestión del tráfico, las tecnologías utilizadas y el hardware necesario. Cada uno de estos aspectos influye de manera radical en su desempeño [1].

Desde los inicios de la revolución digital, estas decisiones han cobrado una importancia creciente en una era cada vez más marcada por la información [2]. En la actualidad, las redes de telecomunicaciones constituyen un pilar fundamental para la creación de empresas, el funcionamiento de gobiernos, la educación y la conexión de comunidades y familias [3], especialmente tras el impacto de eventos globales recientes, como la pandemia de COVID-19 [3].

Más allá de su impacto social, las telecomunicaciones se han consolidado como un motor clave para las actividades económicas modernas, facilitando el crecimiento a través de la creación de nuevos contenidos, servicios y aplicaciones que promueven la innovación y el desarrollo económico [4], [5]. Esto subraya el papel central que tienen en la transformación de los mercados globales.

1.2. Aumento de la demanda de tráfico

Desde inicios del siglo XXI, el tráfico de internet ha dominado las redes de comunicación, registrando un notable crecimiento promedio anual del 40 % [6], lo que implica que la demanda se duplica aproximadamente cada 2-3 años. Este crecimiento está impulsado por dos factores principales: el constante aumento en el número de usuarios y el creciente consumo de ancho de banda por cada uno de ellos, siendo este último el que más impacto genera.

Un estudio de caso en el Reino Unido revela que más del 90 % del crecimiento proyectado en el consumo de datos entre 2016 y 2030 se debe a cambios tecnológicos, más que a factores demográficos [7]. El surgimiento de aplicaciones multimedia interactivas y de alto consumo de datos, como el video on-demand, la televisión en alta definición (HDTV) y la computación en la nube [8], es uno de los principales motores de este incremento. Como resultado, esta tendencia ha ejercido una inmensa presión sobre la infraestructura de telecomunicaciones existente.

La Figura 1.1 ilustra el incremento en la cantidad de usuarios conectados a internet entre 2018 y 2023, expresado en miles de millones. Los datos indican que para

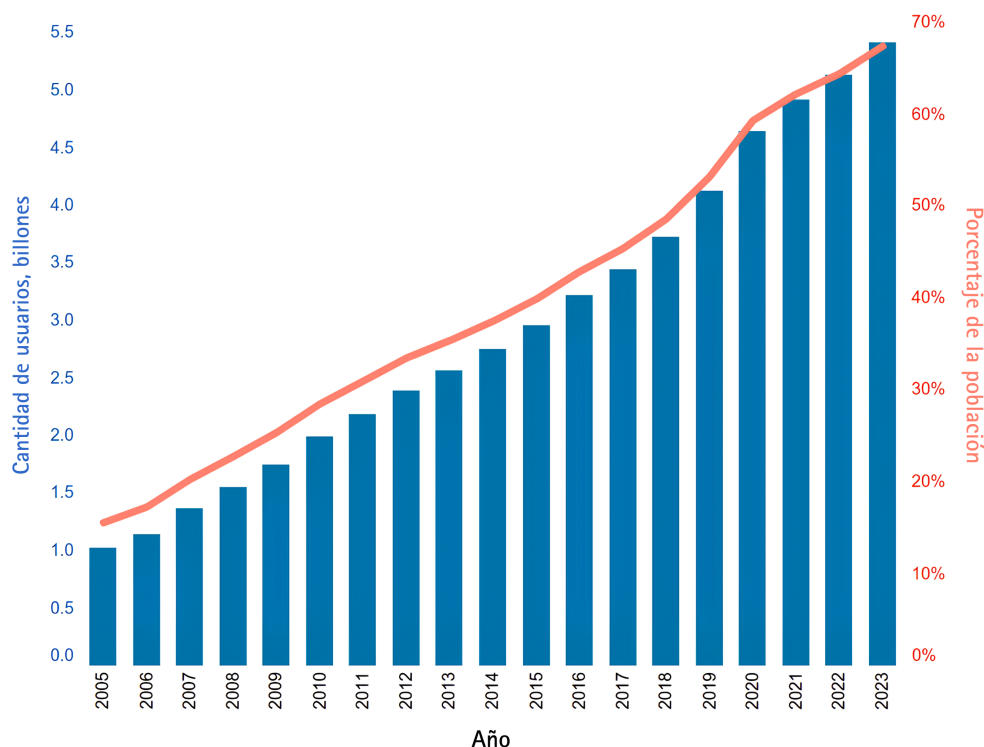


FIGURA 1.1: Crecimiento global de usuarios de Internet entre los años 2005 y 2023 [9].

2023, la población desconectada se redujo a aproximadamente 2.6 mil millones, lo que representa el 33 % de la población mundial [9]. En naciones desarrolladas, la penetración de internet es aún más pronunciada: en 2020, nueve de cada diez personas usaban internet, y para 2023, esta cifra alcanzó el 93 %, evidenciando una tendencia hacia la conectividad universal.

En consonancia con el aumento de usuarios, la Fig. 1.2 muestra el uso de ancho de banda internacional por región entre 2017 y 2022. Esta figura revela un crecimiento exponencial, mostrando cómo el tráfico global se duplica aproximadamente cada 2-3 años. Para ilustrar esta tendencia, en 2017 el uso total de ancho de banda era de aproximadamente 292 Tbit/s, alcanzando los 720 Tbit/s en 2020. La región de Asia-Pacífico, caracterizada por su alta densidad poblacional, encabeza este crecimiento acelerado. Aunque regiones como África, la Comunidad de Estados Independientes (CIS) y los Estados Árabes presentan un menor consumo en términos absolutos, también exhiben un crecimiento notable.

Un factor que aceleró aún más este crecimiento fue la pandemia de COVID-19. Durante los años 2020 y 2021, más de un tercio de la población mundial estuvo en aislamiento debido a las restricciones impuestas por la crisis sanitaria [11]. Estas medidas de confinamiento, junto con el imperativo del distanciamiento social, incrementaron significativamente la dependencia de las tecnologías de la información y la comunicación para trabajar, estudiar, socializar y acceder a servicios esenciales. Empresas e individuos se vieron obligados a adaptarse rápidamente a la nueva realidad del trabajo remoto y la educación en línea. Esta situación inesperada provocó un aumento considerable en el uso de las telecomunicaciones, con algunos operadores experimentando hasta un 60 % de incremento en el tráfico de internet en comparación con

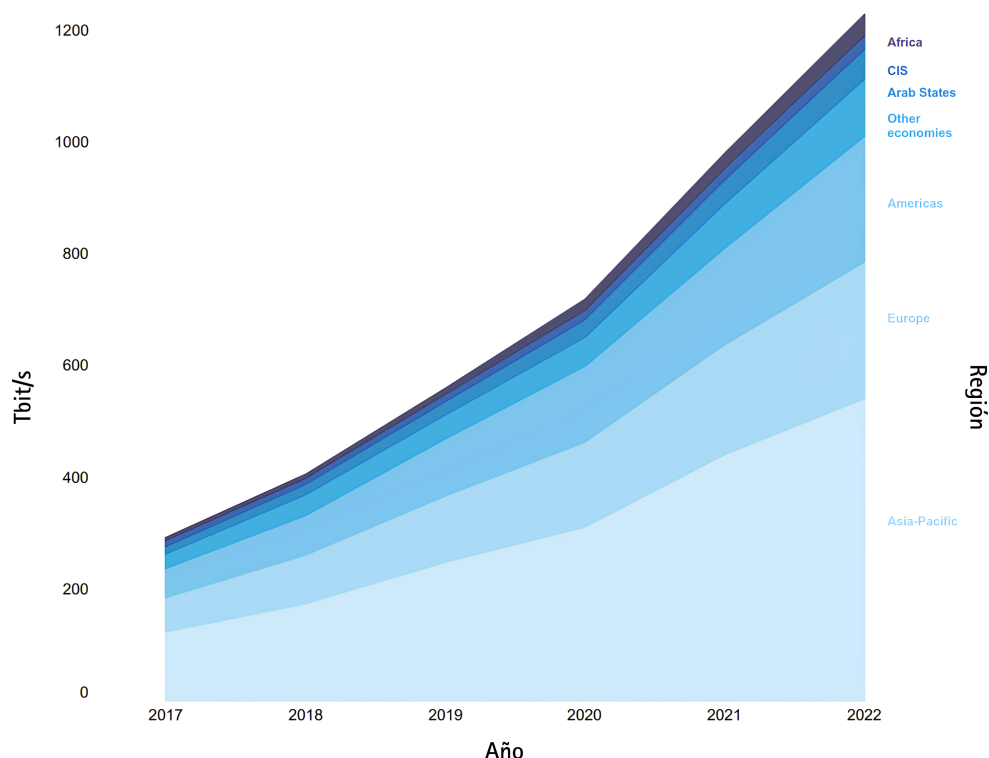


FIGURA 1.2: Evolución del uso de ancho de banda por región entre 2017-2022 [10].

periodos previos a la crisis [12]. Consecuentemente, fue necesaria una mayor inversión en infraestructura de telecomunicaciones y un aumento en la capacidad de las redes para satisfacer la creciente demanda [12]. Además, surgieron iniciativas regionales como la Agenda Digital para América Latina y el Caribe (eLAC2022) [13], que delinearon una hoja de ruta para un entorno hiperconectado.

La pandemia de COVID-19, aunque temporal, dejó una huella duradera en los patrones de comunicación y colaboración global. La persistencia del trabajo remoto y la educación en línea, incluso después de la fase aguda de la crisis sanitaria, continúa ejerciendo una presión significativa sobre la infraestructura de telecomunicaciones [14]. Este fenómeno, sumado al incremento sostenido de usuarios de internet y al aumento exponencial en el consumo de ancho de banda, plantea desafíos sin precedentes para el sector. La falta de una respuesta adecuada a este crecimiento podría desembocar en un colapso de las telecomunicaciones o en una “nueva normalidad” caracterizada por un deterioro sustancial en la calidad del servicio (QoS), comparable a la congestión crónica en una ciudad sin planificación urbana adecuada [6].

Ante este escenario, la solución no puede limitarse a un mero incremento cuantitativo de la infraestructura existente, ya que este enfoque resultaría insostenible a largo plazo y económicamente inviable para los proveedores [6]. Se requiere, en cambio, un enfoque holístico que integre mejoras en la velocidad y capacidad de transmisión, mientras se optimiza simultáneamente la eficiencia energética, la viabilidad económica y la utilización del espacio físico [15]. Solo mediante esta aproximación integral será posible desarrollar una infraestructura de telecomunicaciones robusta y sostenible, capaz de anticiparse al crecimiento del tráfico de internet y satisfacer las demandas de una sociedad cada vez más digitalizada.

1.3. Breve evolución de las telecomunicaciones

En medio de esta constante adaptación tecnológica, resulta esencial revisar el desarrollo histórico de las tecnologías de las telecomunicaciones.

1.3.1. Previo a la fibra óptica

El desarrollo de las telecomunicaciones modernas se inició en el siglo XIX con la invención del telégrafo, un dispositivo revolucionario que transmitía impulsos eléctricos a través de cables, principalmente de cobre, utilizando el código Morse [16]. Esta innovación marcó un hito al permitir, por primera vez, la comunicación casi instantánea a larga distancia [17].

El teléfono, inventado por Alexander Graham Bell en 1876, representó el siguiente gran avance, ya que hizo posible la transmisión de voz a través de líneas de cobre [16]. Esta tecnología no solo mejoró la velocidad de comunicación, sino que también permitió una conexión más personal e inmediata entre individuos y organizaciones, impulsando el desarrollo de infraestructuras urbanas [16].

A mediados del siglo XX, el desarrollo de la tecnología de microondas y satélites abrió nuevos caminos para la comunicación global y transcontinental, ampliando drásticamente el alcance y la capacidad de las redes de telecomunicaciones terrestres [16]. Estas innovaciones posibilitaron la comunicación en tiempo real entre continentes, estableciendo las bases para la globalización moderna.

1.3.2. Fibra Óptica

Durante la segunda mitad del siglo XX, Charles Kao y sus colaboradores realizaron un trabajo pionero en la utilización de la fibra óptica como medio de telecomunicación. Demostraron que la alta pérdida de la señal en las fibras ópticas de la época se debía a impurezas en el material, y no a un defecto inherente a la tecnología [18]. Este hallazgo fue fundamental y eventualmente le valió a Kao el Premio Nobel de Física.

Gracias a este logro revolucionario, a mediados de los años 70 se desplegaron los primeros enlaces de fibra óptica [19]. Estos enlaces, empleando predominantemente fibras de vidrio, permitieron transmitir señales electromagnéticas mediante pulsos de luz. Debido a su mayor capacidad de ancho de banda, extenso alcance y superior resistencia a interferencias electromagnéticas [20], la fibra óptica se convirtió rápidamente en el medio por excelencia para redes de larga distancia, dando origen a las llamadas *redes ópticas* [1].

1.3.3. Redes Ópticas

El impacto de la fibra óptica se hizo aún más evidente en las décadas siguientes. Durante los años 1980 y 1990, con la llegada de internet, surgió un crecimiento sin precedentes en la demanda de servicios de ancho de banda. Este aumento provocó la necesidad de incrementar la capacidad de las redes sin tener que desplegar más y más fibra. Para enfrentar este desafío, surgieron dos técnicas clave que permitieron maximizar el uso de las redes de fibra óptica existentes: *Time-Division Multiplexing* (TDM) y *Wavelength-Division Multiplexing* (WDM) [21].

1.3.4. Time-Division Multiplexing

TDM [19] permitió la transmisión de múltiples señales de datos en diferentes intervalos de tiempo dentro de un único canal. Para implementar esta técnica, se utiliza un multiplexor de tiempo en el punto de origen y un demultiplexor de tiempo en el punto de destino. El multiplexor agrupa las señales de datos en una señal compuesta que se transmite a través del canal, mientras que el demultiplexor las separa en sus componentes originales al final del trayecto, optimizando así el uso del recurso físico y minimizando la superposición de señales.

En la Figura 1.3 se ilustra un sistema TDM con un multiplexor (MUX) y un demultiplexor (DEMUX) temporal. El MUX recibe cuatro señales identificadas por las letras A, B, C y D, cada una representada con un color: morado, azul, verde y rojo, respectivamente. Estas señales se agrupan secuencialmente en el MUX, formando una señal compuesta que fluye en el sentido de la flecha *Flujo de la Señal*. Al llegar al DEMUX, esta señal compuesta es separada nuevamente en sus componentes originales, que son redirigidas a sus respectivas salidas identificadas por las mismas letras y colores.

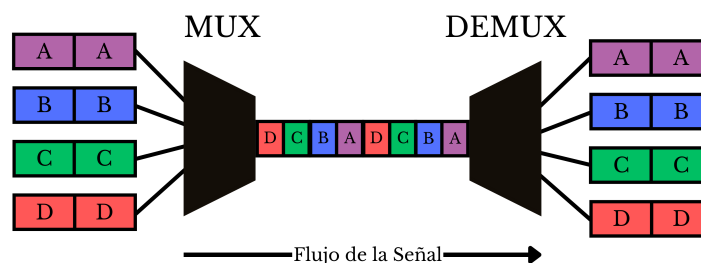


FIGURA 1.3: Sistema TDM con MUX y DEMUX temporales.

1.3.5. Wavelength-Division Multiplexing

WDM [22] permite enviar múltiples señales de datos de forma simultánea a través de una única fibra óptica, al asignar cada señal a una longitud de onda específica dentro del espectro óptico. Para su funcionamiento, se utilizan multiplexores y demultiplexores ópticos. En el origen, el multiplexor toma varias señales de datos independientes y las combina en una sola señal óptica, que luego se envía a través de la fibra. En el extremo receptor, el demultiplexor separa la señal óptica en sus diferentes longitudes de onda y las redirige a sus respectivos canales de datos. Esta técnica permitió un aumento drástico en la capacidad de transmisión de datos, maximizando el ancho de banda disponible [21].

En la Figura 1.4, se muestra un sistema WDM con un multiplexor (MUX) y un demultiplexor (DEMUX) óptico. Se tienen cuatro señales de entrada, las cuales ingresan al MUX a través de transpondedores (TP1 a TP4), encargados de realizar la conversión entre la señal eléctrica y el medio óptico, y viceversa. Cada señal se representa con un color diferente, lo cual indica su longitud de onda específica. Estas señales se combinan en el MUX y se transmiten como una única señal a través del canal óptico, siguiendo la dirección de la flecha indicada por *Flujo de la Señal*. Al llegar al DEMUX, la señal combinada se separa nuevamente, y cada longitud de onda se redirige a sus respectivos transpondedores (TP5 a TP8), restaurando las señales originales.

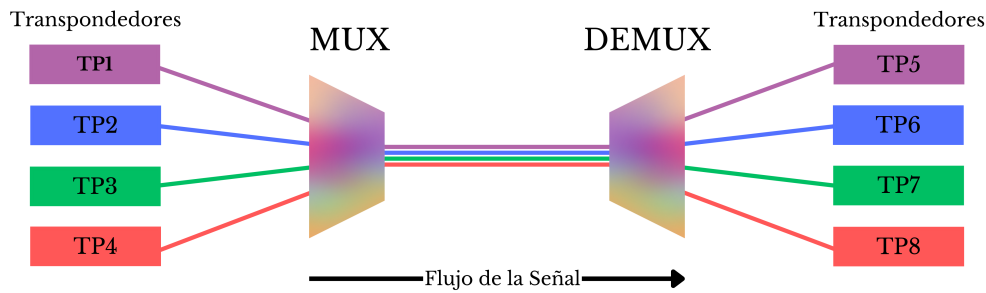


FIGURA 1.4: Sistema WDM con MUX y DEMUX ópticos.

1.3.6. Redes Ópticas Transparentes

Uno de los avances más importantes que ocurren con WDM es la habilidad de transmitir información manteniéndose en el dominio óptico a lo largo de toda la fibra. En sus inicios, estos sistemas requerían la regeneración individual de cada longitud de onda aproximadamente cada 40 kilómetros debido a la degradación de la señal óptica [1]. Este proceso, costoso e ineficiente, demandaba un uso intensivo de equipos electrónicos. Sin embargo, el panorama cambió significativamente con la introducción del baipás óptico (*optical bypass*).

Esta innovación, que mantiene la señal en el dominio óptico, eliminó la necesidad de regeneración electrónica [1]. Avances cruciales como los amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFAs) y las técnicas de conmutación óptica hicieron posible esta transformación. Estas mejoras no solo aumentaron la eficiencia de los sistemas, sino que también los hicieron más rentables y escalables, facilitando así la expansión de la tecnología WDM [1].

La implementación de estas estrategias dio origen al concepto de *redes ópticas transparentes* [23], capaces de transmitir señales exclusivamente a través del medio óptico, sin conversiones electrónicas intermedias, independientemente de su tasa de bits o formato de modulación. No obstante, el hecho de mantenerse completamente en el dominio óptico implica que no se pueden realizar conversiones de longitud de onda a mitad de camino [24], lo que impone ciertas restricciones en la flexibilidad y gestión de los recursos. A pesar de estas limitaciones, esta evolución marcó un hito significativo en el desarrollo de las redes ópticas, sentando las bases para los sistemas de alta capacidad y eficiencia utilizados en la actualidad.

1.3.7. Dense Wavelength-Division Multiplexing

La evolución natural de WDM fue *Dense Wavelength-Division Multiplexing* (DWDM), una tecnología impulsada por el concepto de *bandwidth mining* [6]. Este término hace referencia a la explotación y optimización máxima del ancho de banda disponible, de forma similar a cómo se extraen recursos de una mina. Implica el uso de técnicas avanzadas de modulación para aprovechar al máximo cada parte del espectro utilizable. De ahí el término *Dense* (denso) en DWDM.

En la actualidad el espectro utilizado para DWDM se sitúa entre los 1530 nm y 1565 nm [25]. Esta configuración sigue el estándar establecido por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-T), que organiza este rango de longitudes de onda (conocido como banda C) en intervalos fijos de 50 GHz [26]. Gracias a estas características, DWDM logra optimizar el uso del espectro disponible, permitiendo

transportar hasta 80 canales (o longitudes de onda) en una sola fibra. Además, es posible combinar varios canales en estructuras conocidas como *super-channels* (super-canales) para incrementar aún más la capacidad de transmisión [27].

1.3.8. Actualidad

Aunque DWDM sigue siendo la tecnología predilecta para las redes ópticas transparentes [25], otras variaciones de WDM han surgido para resolver necesidades específicas de la industria.

Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM), surge como una alternativa diseñada principalmente para redes de corto/medio alcance [28]. CWDM reduce el número de canales a 8 y utiliza un rango espectral que va desde los 1470 nm hasta los 1610 nm, con intervalos de 20 nm. Esta estrategia, en lugar de enfocarse en aumentar la capacidad de la red, se centra en hacer más accesible el mercado de las telecomunicaciones, al reducir tanto los gastos de capital (CapEx) como los costos operativos (OpEx), gracias a un diseño más sencillo y al empleo de componentes más económicos [28].

En el contexto de redes 5G, otras variaciones de WDM también están ganando relevancia, como *Medium Wavelength-Division Multiplexing* (MWDM) [29] y *LAN Wavelength Division Multiplexing* (LWDM) [30]. MWDM extiende las capacidades de CWDM comprimiendo los intervalos de longitud de onda de 20 nm a 7 nm, lo que permite una mayor capacidad en distancias medias. Por otro lado, LWDM opera en la banda O (1260 nm a 1360 nm) y es ideal para comunicaciones de corta distancia, como redes de área local.

Estas tecnologías representan enfoques especializados que responden a diversas necesidades en los escenarios de redes actuales. No obstante, a medida que el tráfico de datos continúa en aumento, la industria enfrenta un nuevo desafío: el *capacity crunch*.

1.4. Capacity Crunch

En las primeras etapas del uso de WDM, la capacidad era significativamente mayor a la que se requería [20], por ende ante la necesidad de transmitir mas información era tan simple como utilizar otras longitudes de onda que estuvieran disponibles. No obstante, con el paso del tiempo y el incremento constante en la demanda de tráfico, el espectro utilizable se ha ido acotando [20], llevando a la industria a enfrentar un nuevo desafío.

En este contexto surge el concepto de *capacity crunch* [6], que hace referencia al punto crítico en el que las redes ópticas, utilizando las tecnologías actuales, ya no podrán satisfacer la creciente demanda de tráfico. Este fenómeno no solo amenaza la viabilidad de los servicios existentes, sino que también limita la introducción de nuevas aplicaciones y servicios que dependan de una comunicación rápida y confiable.

Se estima que, al ritmo de crecimiento actual, el *capacity crunch* de las redes ópticas transparentes podría alcanzarse en esta misma década [6]. Este inminente escenario contrasta con el pasado, cuando los avances tecnológicos, como DWDM, permitían aumentar la capacidad simplemente utilizando más espectro.

1.4.1. Soluciones prometedoras

Frente al inminente capacity crunch, academia e industria han enfocado sus esfuerzos en desarrollar nuevas tecnologías que aborden las limitaciones actuales de las redes ópticas transparentes [6]. Estas tecnologías buscan no solo aumentar la capacidad de transmisión, sino también mejorar su eficiencia y flexibilidad.

Flex-Rate

La eficiencia de transmisión (espectral) en las redes ópticas transparentes está dada en gran medida por el uso de formatos de modulación (FM) [20]. Formatos avanzados como *Quadrature Phase-Shift Keying* (QPSK) y *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) son ampliamente utilizados debido a su capacidad para codificar mayor cantidad de información por símbolo transmitido [31], [32].

Un FM de alto nivel permite transmitir una mayor tasa de datos en un canal o conjunto de canales. Sin embargo, aunque estos formatos aumentan la capacidad de transmisión, también generan que la señal sea más vulnerable a la atenuación y a otros factores de degradación, lo que puede reducir su alcance efectivo [32].

Para enfrentar este desafío, surge el concepto de *flex-rate* [25]. Este esquema permite ajustar dinámicamente el FM según las condiciones de la red y los requisitos específicos de transmisión. Para distancias cortas, donde la señal es menos susceptible a degradaciones, se pueden utilizar FM más densos, maximizando así el uso del espectro. En contraste, para transmisiones a larga distancia, se emplean FM de menor nivel para garantizar una mayor robustez de la señal. Los sistemas DWDM más modernos ya utilizan flex-rate para aumentar la eficiencia espectral de la transmisión [27].

Multi-Banda

Actualmente, los proveedores de servicios de internet (ISP) operan principalmente en la banda C porque ofrece las longitudes de onda con menos pérdidas de transmisión [31]. Sin embargo, su ancho espectral de solo 30 nm se ha vuelto insuficiente para cubrir la creciente demanda de capacidad [33].

La propuesta *Multi-Banda* (MB) [33] ofrece una solución a este desafío, al extender el espectro hacia bandas adyacentes a la banda C, que también presentan niveles relativamente bajos de pérdida. Este enfoque propone utilizar el rango de longitudes de onda desde los 1260 nm a 1675 nm, incluyendo nuevas bandas como la L, S, E, O y U. Aunque estas bandas presentan pérdidas ligeramente superiores en comparación con la banda C, siguen siendo adecuadas para comunicaciones de alta capacidad [34].

El atractivo de MB radica en su habilidad para aumentar la capacidad de las redes sin necesidad de desplegar nuevas fibras, optimizando el uso de la infraestructura existente [31]. Esto ofrece una ventaja considerable en términos de costos y tiempo, facilitando una expansión rápida y eficiente del ancho de banda disponible [35].

Space-Division Multiplexing

Otra de las propuestas clave para aumentar la capacidad de las redes ópticas es la innovación y el desarrollo de la infraestructura que las sostiene: la fibra. En este contexto, *Space Division Multiplexing* (SDM) introduce el uso de fibras avanzadas,

como *multi-core* (multi-núcleo) y *multi-mode* (multi-modo). Estas permiten aumentar el número de canales de transmisión en una sola fibra, lo que equivale a operar varias fibras en paralelo, pero con menores costos y mayor eficiencia [36].

A modo de ilustración, el uso de una fibra de tres núcleos permite un rendimiento equivalente al uso de tres fibras mono-núcleo de forma paralela. Esta mejora se traduce en un aumento del 300 % en la capacidad de la red una vez implementada en toda la infraestructura [37]. Por lo tanto, dependiendo de la cantidad de núcleos o modos utilizados, es posible aumentar significativamente la capacidad de la red en varios órdenes de magnitud. Sin embargo, es importante señalar que este incremento teórico se puede ver afectado en la práctica por la interferencia o *crosstalk* entre núcleos adyacentes, donde la señal entre núcleos vecinos degrada la calidad de la transmisión [38].

Flex-Grid

Hasta este punto, las redes ópticas han dividido el espectro utilizable en canales fijos de 50 GHz, a lo que se le conoce como *fixed-grid* (grilla fija). Este esquema a menudo conduce a una utilización ineficiente del espectro, especialmente en conexiones que requieren menos ancho de banda. Por ejemplo, una conexión de 100 Gbit/s que utiliza 16QAM como formato de modulación, solo requiere 12,5 GHz de ancho de banda. En un esquema de asignación fija de 50 GHz, esto dejaría 37,5 GHz de espectro sin utilizar [39]. Esta ineficiencia llevó a la academia a concluir que *fixed-grid*, utilizada durante más de una década, se convertiría en un cuello de botella [20], especialmente al enfrentar velocidades emergentes como las de 400 Gbit/s o superiores.

Con el objetivo de mejorar esta situación, se introduce *flex-grid* (grilla flexible), una técnica que permite una asignación más eficiente del espectro disponible [40], al emplear fragmentos más granulares de hasta 6,25 GHz [41]. Esto permite ajustar la asignación del espectro a las necesidades particulares de cada conexión, maximizando el uso de los recursos disponibles.

En la Figura 1.5 se compara el funcionamiento de los esquemas *fixed-grid* y *flex-grid*. A la derecha, se presentan tres tipos de conexiones, representadas por figuras trapezoidales en color gris. El tamaño de cada figura está directamente relacionado con la cantidad de datos que transmiten: las más grandes representan una transmisión de 100 Gbit/s, mientras que las medianas y pequeñas corresponden a 40 Gbit/s y 10 Gbit/s, respectivamente. En el esquema *fixed-grid*, cada canal ocupa un espacio constante de 50 GHz, sin ajustarse al ancho espectral necesario para cada conexión. En contraste, el esquema *flex-grid* ofrece una estructura más adaptable, permitiendo que los canales ajusten su tamaño para ocupar múltiplos de 12,5 GHz según sus necesidades. Esto se traduce en la transmisión de la misma cantidad de información en un espacio más reducido.

Redes Ópticas Elásticas

Dentro de estas innovaciones, surge el concepto de *Redes Ópticas Elásticas* (*Elastic Optical Networks*, EONs), que integran el uso de *flex-grid* y *flex-rate*, en un mismo esquema [40].

En las EONs, el uso de *flex-grid* permite dividir el espectro óptico en unidades fundamentales llamadas *Frequency Slot Units* (FSUs) o simplemente *Slots*, donde cada

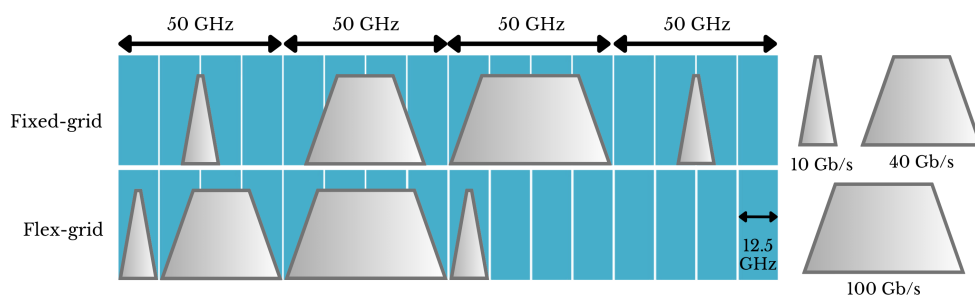


FIGURA 1.5: Comparación de esquemas Fixed-Grid y Flex-Grid [42].

FSU típicamente tiene un espaciado de canal de 12,5 GHz [25]. Esto permite asignar uno o varios FSUs a cada conexión, según su demanda específica de capacidad.

Cuando se integra con flex-rate, la flexibilidad se incrementa aún más. La granularidad de flex-grid permite maximizar el uso de los FM más eficientes, lo que a veces no es posible en sistemas basados en fixed-grid, donde los canales con espaciados de gran tamaño limitan la capacidad de ajustar del espectro [25].

La Figura 1.6 ofrece una representación visual de las configuraciones fixed-grid, flex-rate y EONs. En la Subfigura (a), se muestran cuatro demandas utilizando la configuración fixed-grid, en la cual cada conexión utiliza un canal fijo de 50 GHz, sin importar sus necesidades de capacidad o distancia. En la Subfigura (b), se presenta la configuración flex-rate, donde el FM se ajusta de acuerdo con los requisitos de cada demanda; por ejemplo, las demandas 2 y 3, que tienen distancias relativamente cortas, emplean modulaciones de mayor densidad, como 16-QAM, lo cual está representado en color naranja. Aunque flex-rate mejora la eficiencia de transmisión, el ancho de banda asignado sigue siendo fijo (50 GHz) debido a la rigidez de fixed-grid. Finalmente, en la Subfigura (c), se utiliza la configuración EON, que combina los principios de flex-rate y flex-grid. En este caso, el uso del espectro alcanza su mayor eficiencia y adaptabilidad, superando a los escenarios previamente presentados.

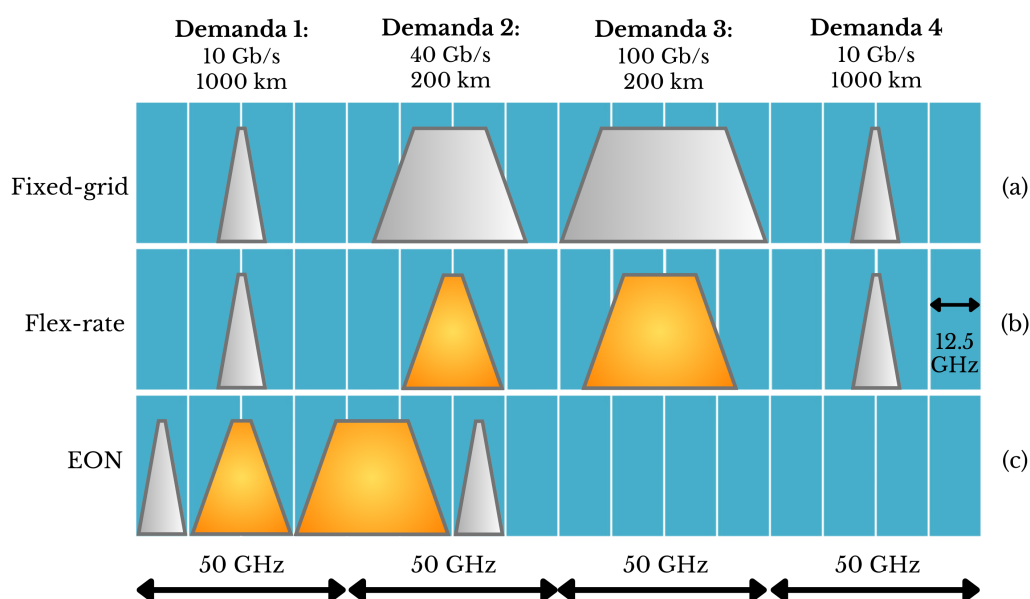


FIGURA 1.6: Comparativa de los Principios de Fixed-Grid, Flex-Rate y EONs.

1.4.2. Direcciones futuras y oportunidad

En la actualidad, muchos ISP aún dependen de tecnologías como DWDM para satisfacer las demandas crecientes de capacidad [6]. Sin embargo, esta tecnología no es una solución permanente; tarde o temprano deberá ser mejorada o reemplazada para seguir el ritmo de las necesidades de tráfico. Esta urgencia se ve acentuada por el despliegue de las redes 5G y la inminente llegada de 6G, que ejercerán una presión adicional sobre las infraestructuras de telecomunicaciones [34].

Ante las diversas alternativas existentes, elegir una tecnología sobre otra no es una decisión trivial, ya que influyen factores económicos, tecnológicos y el estado particular de la infraestructura de la red que se desea desarrollar [43]. Es importante mencionar que estas tecnologías no son mutuamente excluyentes; de hecho, en un escenario ideal, implementar todas las soluciones de manera conjunta podría mejorar sustancialmente la capacidad de las redes ópticas. Sin embargo, los recursos son limitados. Por ello, es fundamental basar la decisión en análisis adecuados que consideren estas restricciones.

Tecnologías como SDM, si bien presentan incrementos en varios ordenes de magnitud, su adopción plantea desafíos significativos. El reemplazo de la infraestructura de fibra existente por fibras multi-core o multi-mode conlleva costos prohibitivos [34]. Además, estas nuevas infraestructuras requieren un consumo energético considerablemente mayor, lo que genera preocupaciones sobre un posible *energy crunch*—un problema similar al *capacity crunch*, pero relacionado con la creciente demanda de energía y la necesidad de optimizar su consumo [6]. Debido a estas limitaciones, esta tesis se enfocará en soluciones más inmediatas, pero sin perder de vista que SDM podría ser una solución viable a largo plazo.

En este contexto, tanto MB como EON se posicionan como respuestas prometedoras al *capacity crunch*. Existe un consenso en la comunidad académica de que la combinación de MB, utilizando la configuración C+L, es la opción más adecuada para incrementar la capacidad de las redes ópticas transparentes en el corto plazo [6], [33], ofreciendo un aumento incluso mayor en comparación con EONs en banda C. Sin embargo, después de la banda L, el debate sigue abierto: ¿Cuál es el siguiente paso? ¿Qué banda debería ser la siguiente en el proceso de expansión? ¿Se debiera continuar expandiendo MB u optar por integrar otros enfoques? Estas preguntas aún no tienen respuestas definitivas [33], lo que subraya la necesidad de más investigación en este ámbito.

Por esta razón, esta tesis se propone evaluar ambas alternativas: continuar expandiendo MB o integrar EONs para optimizar el uso del espectro en C+L. La comparación abarcará aspectos como el aumento de capacidad y el rendimiento en diferentes escenarios, proporcionando un marco para la toma de decisiones en el ámbito de las telecomunicaciones.

Capítulo 2

Marco Teórico

Este capítulo tiene como objetivo presentar los conceptos teóricos necesarios para comprender las temáticas que se explorarán en los capítulos subsiguientes. Se explican conceptos clave como la estructura y los componentes de una red, los diversos tipos de tráfico, y otros elementos fundamentales para el análisis y la discusión de este trabajo.

2.1. Estructura de una red óptica

2.1.1. División jerárquica

El término *red* puede tener distintos significados dependiendo del contexto en el que se utilice. En el ámbito de las telecomunicaciones, puede referirse tanto a la totalidad de la infraestructura como a una porción específica de la misma. Cuando se habla de una porción de la red según alguna característica particular, como su capacidad, extensión geográfica o cantidad de usuarios, se emplean términos como *red troncal*, *red regional*, *red metropolitana* y *red de acceso* [1]. La figura 2.1, muestra la división típica de una red óptica en base a su distribución geográfica.

En el extremo más cercano a los usuarios finales se encuentra la red de acceso, que se encarga de distribuir el tráfico hacia y desde los clientes. Esta capa recoge el tráfico de los usuarios y lo envía hacia niveles superiores.

Las redes metropolitanas tienen la función de *agregar* el tráfico de las redes de acceso. Estas redes suelen interconectar las oficinas centrales de las compañías de telecomunicaciones y consolidar el tráfico para su transmisión hacia redes de mayor escala.

Las redes regionales abarcan porciones de la red que interconectan ciudades o, en algunos casos, países. Su extensión suele alcanzar varios cientos de kilómetros, y tienen la capacidad de atender a cientos de miles de usuarios [1]. Estas redes forman una parte esencial en la distribución del tráfico a nivel nacional o internacional.

La interconexión de múltiples redes regionales es llevada a cabo por las redes troncales, estas interconectan países o incluso continentes, a través de largas distancias que pueden superar los miles de kilómetros. Para lograrlo, se utilizan extensos cables de fibra óptica [1]. Las redes troncales manejan el tráfico de millones de usuarios, lo que las convierte en el núcleo de la infraestructura global de telecomunicaciones.

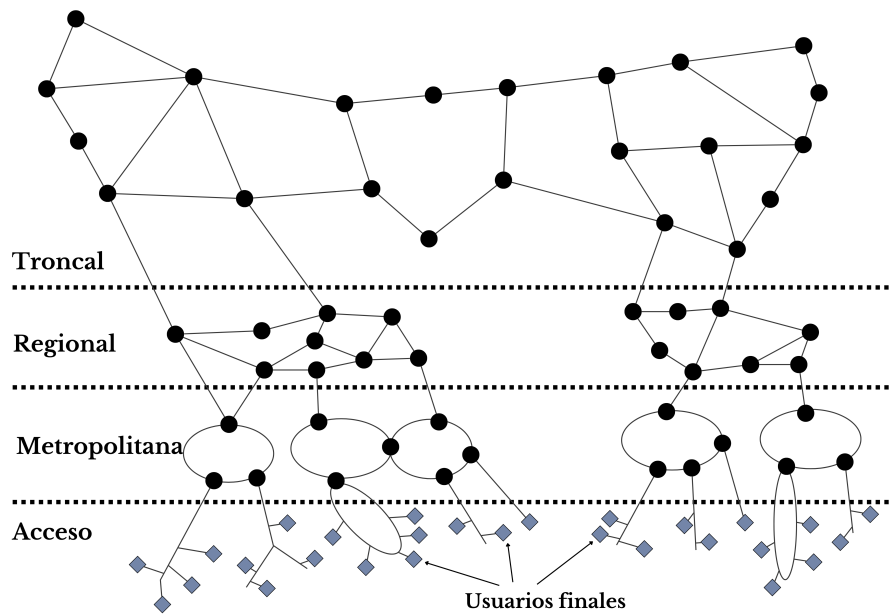


FIGURA 2.1: Jerarquía geográfica de una red óptica [1].

2.1.2. Componentes básicos

Una red óptica regional o troncal se compone de varios nodos interconectados que posibilitan la comunicación y el intercambio de información. Estos nodos, distribuidos estratégicamente en una determinada área geográfica, varían en número según la infraestructura y las necesidades de la región. Su cantidad puede fluctuar entre 10 y 100, o incluso más [25].

La Figura 2.2 ilustra un ejemplo de una red y sus componentes. En ella se muestra una red de 4 nodos A, B, C y D. Cada par de nodos interconectados se une mediante un enlace o *link*, representado por una línea. Estos enlaces generalmente están formados por uno o más pares de fibra óptica, siendo los despliegues de un solo par de fibras los más comunes (por ejemplo, un nodo de grado uno tiene una fibra entrante y una saliente) [44]. La distribución específica de nodos y enlaces se conoce como *topología*.

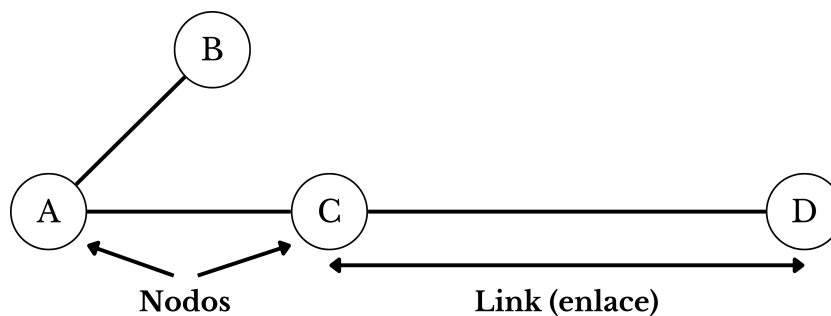


FIGURA 2.2: Componentes básicos de una red [1].

2.2. Despliegue de tecnologías

El despliegue de nuevas tecnologías en las redes sigue un patrón en que los aspectos económicos juegan un rol clave, especialmente a medida que se avanza hacia la red de acceso, donde los costos por usuario final son más elevados [1]. Por esta razón, las tecnologías suelen implementarse primero en las redes troncal, donde las necesidades de capacidad son mayores y los costos pueden ser amortizados más fácilmente. Con el tiempo, y a medida que las tecnologías se abaratan, estas se extienden hacia los niveles más cercanos al usuario final [1].

Un buen ejemplo de este proceso es la implementación de la tecnología WDM. La Figura 2.3 ilustra cómo los costos de infraestructura por nodo de red varían a lo largo del tiempo, ya sea debido a desarrollos tecnológicos o a la reducción en los costos de los componentes. En las etapas iniciales, cuando los costos por nodo rondan entre USD 1 millón y USD 100 mil, WDM se implementa en las redes troncales, donde las necesidades de alta capacidad y grandes distancias justifican la inversión. A medida que los costos comienzan a reducirse, llegando a valores entre USD 100 mil y USD 10 mil, se extiende hacia las redes regionales y metropolitanas. Finalmente, las redes de acceso, que representan el último nivel en adoptar nuevas tecnologías, incorporan WDM cuando los costos por nodo alcanzan entre USD 1 mil y USD 10 mil.

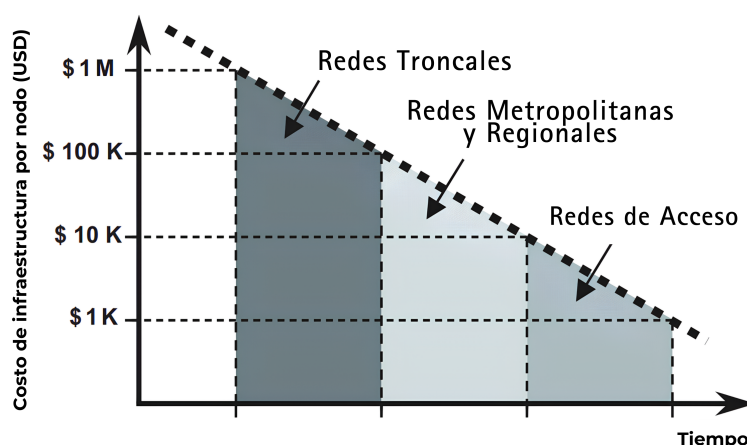


FIGURA 2.3: Evolución temporal de costos de la implementación de WDM por nodo en la red [1]

2.3. Transmisión en el espectro óptico

Los sistemas de comunicación utilizan diversas formas de energía electromagnética para transmitir información. Estas van desde ondas de radio de baja frecuencia, pasando por microondas, luz infrarroja, visible, ultravioleta, hasta llegar a los rayos X y gamma [22]. Cada disciplina dentro de las comunicaciones se enfoca en una porción específica del espectro electromagnético, cuyas propiedades pueden caracterizarse por tres parámetros fundamentales: longitud de onda (metros), frecuencia oscilatoria (hertz) y energía contenida (electronvoltios) [22].

En el ámbito de las comunicaciones ópticas, las señales de transmisión se caracterizan principalmente mediante su longitud de onda. Sin embargo, la frecuencia también se utiliza en el análisis de los efectos no lineales en la fibra y al evaluar la capacidad de transmisión, por ejemplo, en la definición del espaciado entre canales en sistemas DWDM [22].

La porción de *luz* del espectro electromagnético se denomina espectro óptico [45]. Este abarca aproximadamente desde 5 nm en la región ultravioleta hasta 1 mm en el infrarrojo lejano, incluyendo la luz visible entre 400 nm y 700 nm [22]. La Figura 2.4 ilustra el espectro electromagnético en términos de frecuencia, longitud de onda y energía, proporcionando una visión de las diferentes regiones espectrales.

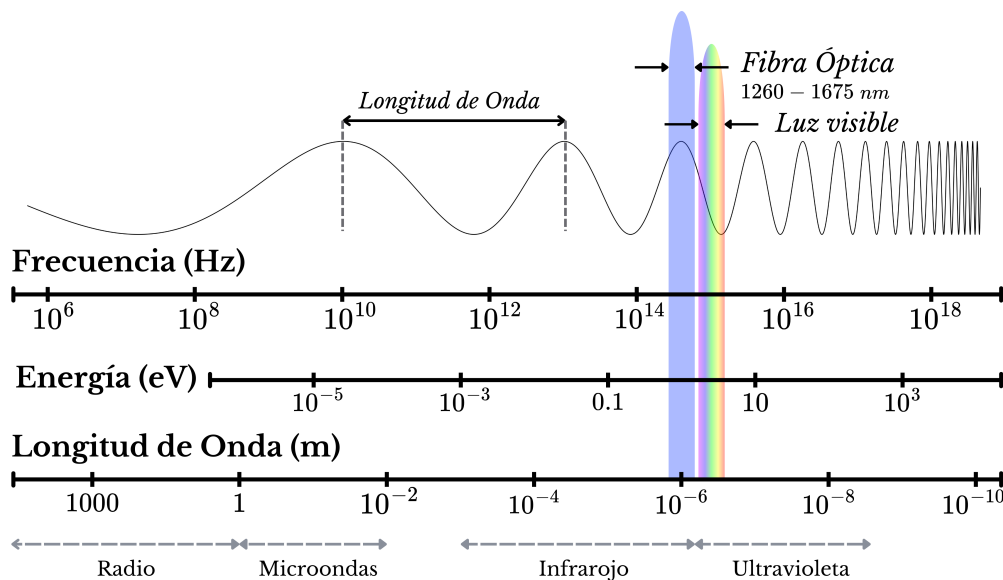


FIGURA 2.4: Espectro de radiación electromagnética [45].

En comunicaciones por fibra óptica, se utilizan rangos específicos dentro del espectro óptico, que van desde 1260 nm hasta 1675 nm [31]. En la Figura 2.4, la franja de color azul representa esta porción del espectro. Dentro de este rango, la ITU-T ha definido seis bandas de transmisión: O, E, S, C, L y U [46], proporcionando un marco estandarizado para la clasificación y utilización del espectro óptico en sistemas de comunicación. Cada una de estas bandas posee propiedades únicas en términos de atenuación y dispersión, lo que influye en su idoneidad para diferentes aplicaciones y distancias de transmisión [22].

La Tabla 2.1 presenta los parámetros fundamentales de las seis bandas ópticas definidas por la ITU-T. Para cada banda, se muestran los rangos de longitud de onda y frecuencia correspondientes, así como el ancho espectral o *ancho de banda* en terahercios (THz).

Banda	Longitud de onda (nm)	Rango de frecuencia (GHz)	Ancho de banda (THz)
O	1260–1360	220,59–227,10; 232,95–238,10	17,5
E	1360–1460	205,48–220,59	15,1
S	1460–1530	196,08–205,48	9,4
C	1530–1565	191,69–196,08	4,4
L	1565–1625	184,62–191,69	7,1
U	1625–1675	179,12–184,62	5,5

TABLA 2.1: Parámetros de las bandas de transmisión óptica [33], [47].

Si bien la banda C es actualmente la más utilizada debido a su menor pérdida [31], las demás bandas ópticas también presentan pérdidas por debajo de 0.4 dB/km, haciéndolas igualmente viables para comunicaciones de alta capacidad [31]. La Figura 2.5 muestra la atenuación en dB/km en función de la longitud de onda y frecuencia para cada una de estas bandas.

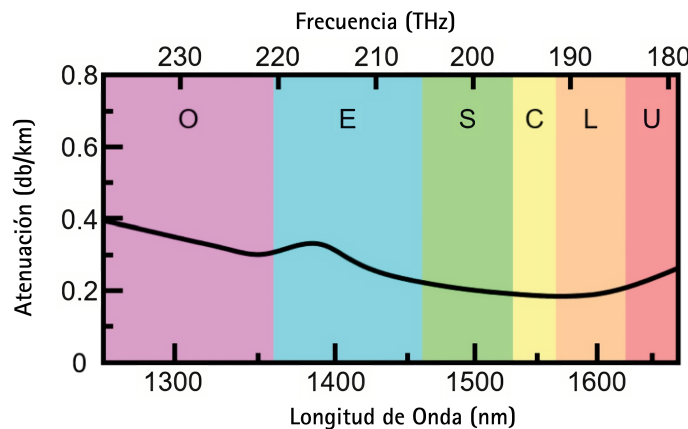


FIGURA 2.5: Atenuación en función de la longitud de onda y frecuencia [47].

2.3.1. Componentes ópticos y electrónicos

Las redes ópticas modernas incorporan diversos componentes que facilitan la transmisión de datos a larga distancia. Ampliando los conceptos presentados en la Sección 2.1.2, esta sección detalla algunos de los elementos ópticos y electrónicos más relevantes en los diferentes puntos de una red.

Transceptor y Transpondedor

El *transceptor* es un dispositivo óptico ubicado en los nodos, cuya función principal es servir como interfaz entre las fibras ópticas y los dispositivos electrónicos, es decir, se encarga de la conversión de señales eléctricas a ópticas (E/O), y viceversa (O/E). Este dispositivo está compuesto por varios componentes, entre los que destacan un *transmisor* y *receptor*.

El transpondedor es un tipo especializado de transceptor que, además de realizar las conversiones E/O y O/E, puede realizar conversiones de longitud de onda (*wavelength switching*) [15], y en el caso de redes flex-rate, adaptar el FM [26], entre otras funciones.

La Figura 2.6 ilustra un esquema simplificado de la estructura y el funcionamiento de un transpondedor WDM. Desde el lado del cliente (*client side*) se reciben señales ópticas, típicamente a 1310 nm, provenientes de equipos como enrutadores IP. Esta longitud de onda, que se encuentra fuera de la región WDM, es convertida a una longitud de onda WDM apropiada y luego transmitida hacia la red. En el lado de la red, el receptor (*network-side receiver*) capta la señal óptica WDM y el transmisor del lado del cliente (*client-side transmitter*) la reconvierte a 1310 nm, realizando también la conversión a formato eléctrico cuando es necesario [15].

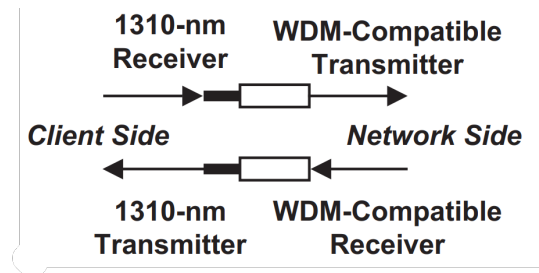


FIGURA 2.6: Transpondedor WDM [15].

ROADM

El Multiplexor Óptico Reconfigurable de Adición/Extracción (*Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer*, ROADM) representa otro componente crítico en los nodos de la red. Este dispositivo gestiona las longitudes de onda presentes en una fibra, permitiendo extraer (*drop*) señales específicas para su procesamiento local y añadir (*add*) nuevas señales, mientras que las demás continúan su transmisión sin alteración [44]. Esta capacidad es fundamental para implementar el concepto de *optical bypass* discutido previamente en la Sección 1.3.6.

Amplificadores

A medida que la señal se propaga a través de la fibra, experimenta degradaciones provocadas por diversos fenómenos, tales como atenuación, dispersión cromática, dispersión por modo de polarización, diafonía lineal y efectos no lineales [48]. Para preservar la integridad de estas señales en redes de larga distancia, como las troncales y regionales, es necesario el uso de amplificadores [44]. Los amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFAs) son una tecnología ampliamente utilizada en sistemas DWDM, debido a su capacidad de operar eficientemente en la banda C y, con algunas adaptaciones, en la banda L [33].

La Figura 2.7 muestra un esquema de una red óptica incorporando amplificadores. En esta configuración, se denomina *span* al segmento de enlace comprendido entre dos sitios de amplificación consecutivos, o entre un nodo y un sitio de amplificación. La ubicación estratégica de estos dispositivos en la red permite mantener niveles de potencia adecuados, asegurando la calidad y alcance de la comunicación [48].

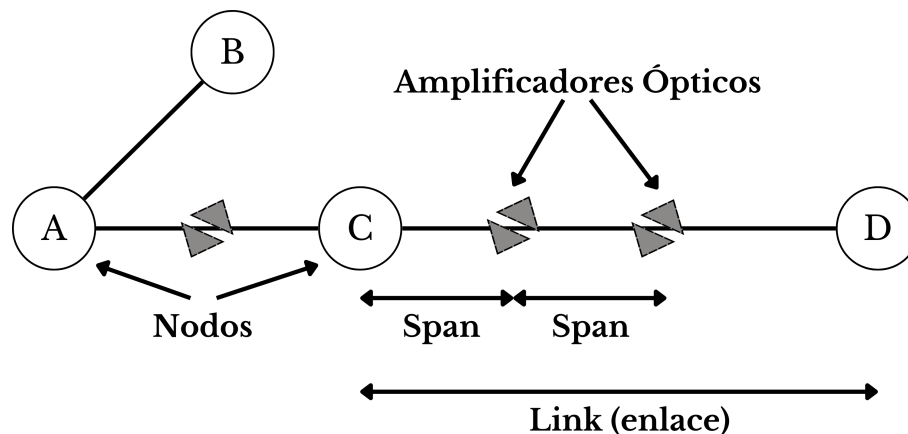


FIGURA 2.7: Representación de una red óptica con amplificadores [1].

2.4. Establecimiento de una conexión

En una red óptica, el establecimiento de una conexión se refiere a la asignación de un canal de comunicación entre dos puntos de la red, utilizando una porción específica del espectro [49].

2.4.1. Lightpath

La combinación de una ruta física y la porción del espectro óptico utilizada constituye un *lightpath*, que representa una conexión activa entre un par de nodos origen-destino [49].

En las redes EON, el concepto de *lightpath* se adapta a un contexto más flexible mediante el uso de canales más granulares, conocidos en la literatura como *slots*. Algunos estudios emplean el término *flexpath* en lugar de *lightpath* [50]; sin embargo, en esta tesis se mantendrá el término *lightpath* para referirse a la combinación de ruta y porción de espectro utilizada, independientemente del contexto.

2.4.2. Calidad de transmisión

El *generalized signal-to-noise ratio* (GSNR), medido en decibelios (dB), es uno de los indicadores de rendimiento fundamentales para evaluar la calidad de transmisión (QoT) en un *lightpath*. Esta métrica cuantifica la calidad de la señal considerando múltiples fuentes de degradación en sistemas de transmisión óptica [51], incluyendo el ruido de emisión espontánea amplificada (ASE), la dispersión Raman estimulada (SRS), la interferencia no lineal (NLI), la dispersión cromática (CD) y la dispersión por modo de polarización (PMD) [31].

El cálculo del GSNR varía según el contexto operativo. En la banda C, los factores dominantes son el ASE y NLI, mientras que en transmisiones MB, el SRS se vuelve significativo [31], [52]. En las EONs, el cálculo del GSNR debe considerar el espacio variable de canales [53] y los diversos FMs [54].

Un GSNR elevado indica una señal más fuerte respecto al ruido, implicando mejor calidad. Inversamente, un GSNR bajo sugiere una señal más débil, potencialmente degradando el rendimiento del sistema [51].

2.4.3. Formato de modulación

Al momento de establecer una conexión, el FM juega un papel crucial, ya que define cómo se codifica la información en las propiedades físicas de una señal óptica [55]. Este proceso impacta directamente en la eficiencia de la conexión y en la cantidad de información transmitida en cada canal o slot, según el enfoque utilizado.

FM avanzados como QPSK y QAM, permiten codificar múltiples bits por símbolo. Esta capacidad incrementa la eficiencia en el establecimiento de conexiones, al aumentar la tasa de datos que puede transmitirse a través de un *lightpath* dado [32].

La elección de un FM adecuado depende de varios factores, como la distancia de transmisión, el ancho de banda disponible y si el *lightpath* cumple con el GSNR requerido. Los FM más avanzados ofrecen mayor eficiencia espectral, pero también generan que la señal sea más vulnerable a la atenuación y a otros factores de degradación, reduciendo su alcance efectivo [32].

2.4.4. Bit Rate

La capacidad de una conexión indica la cantidad de datos que puede transportar por unidad de tiempo, métrica conocida como *tasa de bits* o *bit rate*. Esta medida, expresada típicamente en bits por segundo (b/s), está intrínsecamente relacionada con el FM empleado.

Hasta hace algunos años, las redes ópticas operaban con tasas de 10 Gb/s, 40 Gb/s y hasta 100 Gb/s [21]. Sin embargo, gracias a los avances en técnicas de modulación, junto con mejoras en las condiciones de las redes y los componentes ópticos, se han implementado conexiones con bit rates significativamente más altos, como 200 Gb/s, 400 Gb/s e incluso 800 Gb/s [21], [33].

2.5. Planificación de una red

Son muchas las variables a controlar al momento de operar una red: múltiples rutas, FMs y bit rate a asignar. Por esta razón es fundamental la necesidad de planificar su diseño y operación. Este proceso implica la asignación óptima de recursos para satisfacer la demanda de tráfico, minimizando o maximizando alguna métrica en particular (ej: reducir costos, maximizar rendimiento, aumentar capacidad, etc). A continuación, se presentan los conceptos fundamentales de la planificación en redes, incluyendo los tipos de tráfico y el proceso de asignación de recursos.

2.5.1. Tipos de tráfico

En la planificación de redes ópticas, se distinguen principalmente tres tipos de tráfico: estático, dinámico e incremental [56]. Las redes ópticas actuales operan predominantemente bajo un modelo de tráfico estático [1]. Este tipo de aprovisionamiento se caracteriza porque las solicitudes de conexión son conocidas *a priori* y, una vez establecidas, perduran durante meses o años. La principal ventaja de este enfoque radica en que los ISP, al conocer previamente las conexiones a establecer, pueden optimizar la red antes de su despliegue y desarrollar un planeamiento más elaborado [1].

El tráfico dinámico [1] representa un paradigma opuesto al modelo estático, caracterizándose por su rápida adaptación a la demanda de la red y permitiendo la configuración y desactivación de conexiones en fracción de segundos. En este escenario, las conexiones no son conocidas *a priori*, por lo que el proveedor debe optimizar la red en tiempo real. Las ventajas del tráfico dinámico incluyen una mayor agilidad y eficiencia, permitiendo a los ISP adaptarse a cambios de demanda inesperados [1]. Una ejecución exitosa de este esquema puede resultar en un mejor servicio para los usuarios, proporcionando conexiones más rápidas y confiables. Este enfoque se considera más eficiente en términos de recursos, ya que permite aprovisionar ancho de banda donde realmente se necesita [1].

El tráfico incremental constituye una variante del modelo dinámico. En este escenario, las conexiones tampoco son conocidas y el aprovisionamiento ocurre igualmente en tiempo real; sin embargo, una vez establecidas, se mantienen permanentemente activas [57]. Este modelo refleja con mayor precisión los escenarios de tráfico actuales en comparación con el tráfico dinámico, al representar mejor el crecimiento gradual típico observado en las redes de telecomunicaciones [58]. En este esquema, la red se adapta continuamente, añadiendo nuevas conexiones, lo que resulta en un incremento acumulativo y sostenido del tráfico [57].

2.5.2. Asignación de recursos

Una vez definido el tipo de tráfico, es necesario determinar la ruta y los canales ópticos más adecuados para establecer una conexión; es decir, cómo asignar los recursos. Este es uno de los desafíos más importantes en la planificación de una red [1].

En DWDM, este problema se conoce como el de enrutamiento y asignación de longitud de onda (*Routing and Wavelength Assignment*, RWA) [57]. Esta tarea implica la selección y asignación de la ruta y longitudes de onda más adecuadas para cada conexión entrante. En el contexto de redes ópticas transparentes, debido al diseño de la red y el hardware empleado, este *lightpath* debe mantener exactamente los mismos canales ópticos en todos los enlaces que atraviesa; esta restricción se conoce como restricción de continuidad o *continuity constraint*.

En el caso del escenario estático, dado que el conjunto de conexiones es conocido de antemano, el problema usualmente es resuelto con técnicas de programación lineal entera (ILP) [57]. Sin embargo, en los escenarios dinámico e incremental, las solicitudes de conexión llegan de manera aleatoria, lo que hace que cada situación sea única. Estos últimos escenarios típicamente se abordan utilizando enfoques heurísticos, que suelen implementarse como algoritmos de asignación [57]. En la literatura, se utilizan los términos *offline* y *online* para referirse a la planificación en función de si las decisiones se toman con conocimiento previo del conjunto completo de conexiones (*offline*) o si las decisiones se hacen en tiempo real (*online*) [57].

Los algoritmos de asignación son responsables de distribuir eficientemente los recursos de la red [49]. La elección de un algoritmo adecuado para manejar el problema RWA puede reducir significativamente la competencia por recursos en una red cuya arquitectura no está diseñada para ello [1]. Por el contrario, un algoritmo ineficiente puede comprometer el rendimiento de la red, incluso si la arquitectura es apropiada. Esto resalta su importancia, ya que se traduce en una menor probabilidad de que alguna conexión pueda ser rechazada.

2.6. Métricas de evaluación de una red

En la literatura científica se han propuesto múltiples indicadores para evaluar el rendimiento de una red. La métrica seleccionada depende del aspecto que se desea analizar, tales como aspectos económicos, eficiencia energética o capacidad de transmisión. En esta sección se presentarán dos de las métricas más relevantes y comúnmente utilizadas en la literatura, las cuales proporcionarán el contexto necesario para comprender algunos conceptos que se desarrollarán en las siguientes secciones.

2.6.1. Probabilidad de Bloqueo

La probabilidad de bloqueo, también conocida como *blocking probability* (BP) [59], se define como la proporción de solicitudes de conexión bloqueadas con respecto al total de solicitudes de conexión en la red. La ecuación 2.1 expresa matemáticamente esta métrica.

$$BP = \frac{\text{conexiones bloqueadas}}{\text{conexiones totales}} \quad (2.1)$$

2.6.2. Capacidad de la Red

La capacidad de la red se refiere al volumen máximo de tráfico que el sistema puede gestionar antes de alcanzar un nivel de saturación predefinido [25]. Esta capacidad puede ser evaluada desde dos perspectivas complementarias: (i) la cantidad de conexiones establecidas y (ii) el throughput total alcanzado [60], definido como la suma del bit rate de todas las conexiones establecidas. En ambos casos, la capacidad se determina cuando la red alcanza un umbral de BP, típicamente fijado en 10 % [25]. Para cuantificarla, se incrementa progresivamente el número de conexiones mientras se monitorea el BP acumulado. El punto en que el BP alcanza el umbral del 10 % marca la capacidad efectiva de la red. Esta métrica es especialmente relevante en escenarios de tráfico incremental, donde la cantidad de conexiones aumenta de forma gradual.

Capítulo 3

Definición del Problema

3.1. El desafío del Capacity Crunch

La introducción de WDM y DWDM ha permitido un aumento significativo en la capacidad de las redes ópticas durante las últimas dos décadas. Estas innovaciones no solo han mejorado la capacidad de transmisión, sino que también han permitido una mayor eficiencia en términos de costos y escalabilidad de la red [25]. Sin embargo, a pesar de estos avances, el crecimiento constante y acelerado de la demanda de ancho de banda continúa planteando desafíos significativos.

Las tendencias observadas durante las últimas décadas revelan que la demanda de ancho de banda se duplica aproximadamente cada dos a tres años [6]. Este contexto de crecimiento exponencial hace imperativo el desarrollo de redes que puedan manejar las futuras demandas de tráfico; de lo contrario, se llegará a un punto en el que será teóricamente imposible satisfacerlas con las tecnologías actuales, a este punto se le conoce como *capacity crunch*. Este concepto, acuñado a principios de la década de 2010 [61], marca un punto de inflexión en la historia de las comunicaciones ópticas al reconocer oficialmente que la capacidad de transmisión de una fibra óptica no es ilimitada [62].

Históricamente, antes del desarrollo de DWDM, el aumento en la demanda de servicios de datos se satisfacía principalmente mediante el uso de nuevas tecnologías que incrementaban la capacidad de una sola fibra óptica [62]. Un ejemplo claro es la transición de WDM a DWDM, que significó el aprovechamiento máximo del rango espectral en la banda C. Esta estrategia era vista como una oportunidad de negocio sólida y predecible por operadores, proveedores de servicios y fabricantes de equipos. Sin embargo el espectro utilizable se ha ido acotando [20].

Según [6], se estima que el capacity crunch podría manifestarse esta misma década. Sus efectos podrían variar desde un colapso total de las redes ópticas hasta una "nueva normalidad", en la que los servicios de red podrían sufrir una drástica disminución de QoS, e incluso un incremento en los costos para consumidores y empresas [6].

Para enfrentar este desafío, se requieren soluciones eficientes e innovadoras, enfocadas en la rentabilidad y la escalabilidad de la red [25], aspectos que, en última instancia, son el motor de cualquier industria tecnológica. En ausencia de estas, la única alternativa sería retornar al enfoque tradicional de instalar más y más fibras [20], una solución "post-crunch" que impactaría significativamente el modelo de negocio de los sistemas de comunicación a nivel mundial [62].

3.2. Despliegue de más fibra como solución

Si bien el despliegue de más fibra podría parecer una solución obvia y directa para aumentar la capacidad de las redes, esta alternativa plantea desafíos económicos y logísticos que limitan su viabilidad a largo plazo.

En primer lugar, el despliegue de nueva fibra implica costos elevados [35]. Cuando los conductos existentes ya están ocupados, el costo de instalación puede alcanzar los 25.000 €/km en áreas rurales y hasta 500.000 €/km en áreas metropolitanas [51]. Este tipo de inversión requiere que no solo se considere la capacidad de los operadores para asumir dichos costos, sino también las necesidades del mercado y la disposición de los usuarios a absorber posibles incrementos en las tarifas [35]. Si los consumidores no están dispuestos a pagar precios más altos o si el mercado no justifica esta inversión, las empresas operadoras podrían ver una mayor presión sobre sus márgenes, lo que limitaría la adopción de nuevos servicios tecnológicos.

En segundo lugar, este proceso requiere una significativa inversión de tiempo [35]. La obtención de licencias y permisos por parte de las autoridades locales y nacionales, junto con la mejora de la infraestructura existente, puede enfrentar demoras considerables. Además, existen dificultades logísticas relacionadas con la instalación, especialmente en zonas urbanas densamente pobladas o áreas geográficamente complejas, donde el despliegue resulta particularmente desafiante [35].

En tercer lugar, el incremento de infraestructura física presenta desafíos importantes en términos de gestión y mantenimiento [35]. Los cables de fibra deben protegerse tanto de daños accidentales como intencionales, incluyendo cortes, dobleces o cualquier otra actividad que comprometa su integridad. Adicionalmente, el aumento en la cantidad de cables desplegados incrementa la probabilidad de fallas, dificultando su localización y reparación, lo que añade complejidad a las tareas de mantenimiento [35].

Finalmente, incluso si se lograran superar todos los desafíos mencionados, duplicar la cantidad de cables de fibra óptica solo permitiría duplicar la capacidad de la red, postergando el capacity crunch por dos o tres años más [6]. Al cabo de este período, surgiría nuevamente la necesidad de reiniciar el ciclo de despliegue, perpetuando una estrategia costosa y logísticamente insostenible. Por lo tanto, aunque el despliegue masivo de fibra óptica puede ofrecer una solución temporal, no representa una alternativa viable a largo plazo.

Una situación similar ocurre con SDM, que consiste esencialmente en la instalación de nuevos pares de fibra óptica en la red. Los análisis tecno-económicos indican que los operadores buscan evitar esta alternativa debido a los altos costos de CapEx y las demoras operativas que conlleva [51]. De esta manera, aunque SDM ofrece una solución para aumentar la capacidad de la red, enfrenta las mismas limitaciones económicas y logísticas que el despliegue masivo de fibra.

Ante este panorama de desafíos técnicos, económicos y logísticos, la academia ha propuesto diversas soluciones prometedoras que no requieren el despliegue de fibra adicional. Entre ellas destacan las redes ópticas elásticas (EONs) y las redes multi-*banda* (MB).

3.3. Tendencias tecnológicas actuales

Para abordar el capacity crunch, la academia ha explorado diversos enfoques. Uno de los más estudiados es el uso de EONs en la banda C [20], [25], [26]. Asimismo, la implementación de técnicas MB y la incorporación de nuevas bandas espectrales han sido temas recurrentes en las discusiones tecnológicas [31], [34], [51], [63].

En este contexto, existe un consenso general en que la banda L representa la próxima frontera para expandir la capacidad de las redes ópticas. Esta expansión ofrece ventajas significativas, superando incluso el rendimiento de las EONs en banda C [25]. El uso combinado de las bandas C+L puede duplicar la capacidad de una red sin requerir el despliegue de nueva infraestructura de fibra [31]. Esto es posible debido a que la fibra ITU-T G.652.D, necesaria para MB, es uno de los tipos más ampliamente desplegados a nivel global [34].

La banda L presenta niveles de pérdida similares a los de la banda C, permitiendo reutilizar gran parte de la infraestructura y los dispositivos ópticos existentes [64]. Esta característica no solo proporciona beneficios técnicos, sino que también reduce significativamente los costos de transición [34].

Debido a estas ventajas, la industria ya ha comenzado a realizar actualizaciones hacia la banda L [65], y los primeros sistemas comerciales que combinan C+L están ingresando al mercado [51].

Sin embargo, el siguiente paso en la expansión sigue siendo una incógnita. Si bien tanto las EONs como MB ofrecen ventajas significativas, también presentan desafíos que requieren una evaluación cuidadosa. La elección entre estas tecnologías debe considerar diversos factores, incluyendo eficiencia espectral, flexibilidad, capacidad, escalabilidad y el hardware necesario para su implementación [66].

3.4. Desafíos en Multi-Banda

Las tecnologías MB proponen la expansión del uso del espectro óptico más allá de la tradicional banda C, incorporando bandas adicionales como L, S, E, O y U. Este enfoque multiplica el número de canales disponibles, lo que incrementa significativamente la capacidad de las redes ópticas [33].

En la actualidad, la tendencia tecnológica apunta hacia la implementación de MB, comenzando con la integración de la banda L [64]. Sin embargo, esta transición a C+L es solo el primer paso en la expansión del espectro óptico. Para continuar incrementando la capacidad, la comunidad académica está investigando el uso de bandas adicionales. Se estima que la utilización desde la banda E hasta la L podría aumentar la capacidad de una red en aproximadamente 11 veces en comparación con el uso exclusivo de la banda C [51].

Con la implementación de la banda L en curso, el siguiente avance en las redes MB se centrará en la expansión hacia la banda S (1460-1530 nm) o la banda E (1360-1460 nm) [38]. Estas bandas ofrecen un aumento considerable en la capacidad, representando una progresión natural en la expansión del espectro utilizado. Sin embargo, aunque los beneficios son significativos, su implementación conlleva diversos desafíos que deben ser abordados.

3.4.1. Deterioro en la Calidad de Transmisión

Uno de los desafíos más notables al trabajar con bandas no convencionales es la mayor relevancia de efectos de degradación de la señal, como el SRS [31], que pueden afectar significativamente la QoT.

Alcance efectivo

Las bandas no convencionales exhiben una mayor atenuación, lo que produce un debilitamiento más rápido de la señal durante su propagación por la fibra [31]. Este fenómeno resulta en un menor alcance efectivo para estas bandas. La Figura 3.1 ilustra la atenuación medida (en verde y azul) en dB/km para las fibras ITU-T G.652.A y ITU-T G.652.D, abarcando el rango espectral de 1260 nm a 1625 nm que comprende las bandas de transmisión O, E, S, C y L. La fibra ITU-T G.652.D resulta más adecuada para sistemas MB. Como se observa en el gráfico, las bandas O, E y S presentan una mayor atenuación en comparación con las bandas C y L.

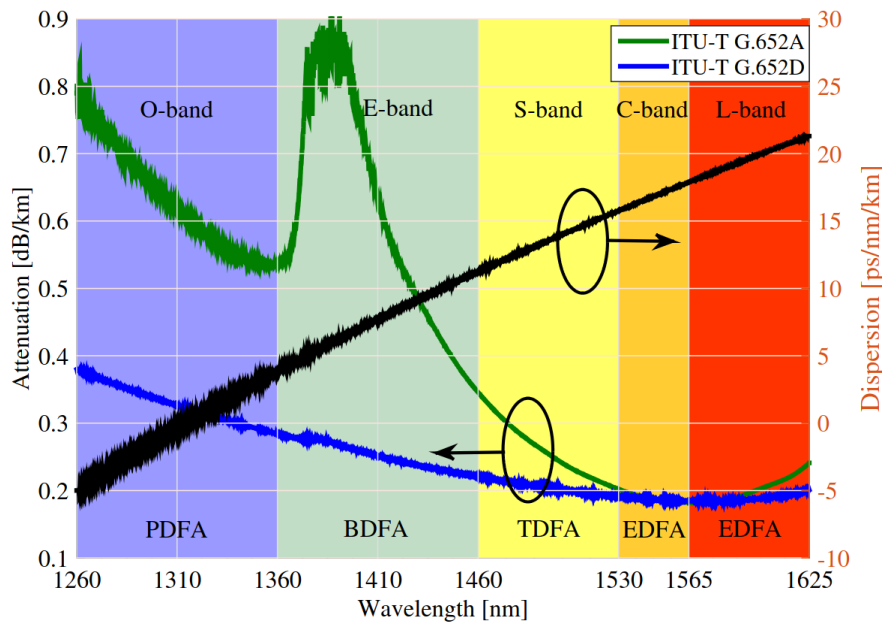


FIGURA 3.1: Bandas de transmisión y su respectiva atenuación (dB/km) [51].

Degradación interbanda

Además de la mayor atenuación en las bandas no convencionales, su utilización puede afectar negativamente el GSNR de las bandas con menor pérdida, como C y L, debido al efecto SRS [31]. Este fenómeno se produce por la transferencia de potencia entre canales: las señales ópticas de menor longitud de onda (mayor frecuencia) transfieren potencia hacia aquellas de mayor longitud de onda (menor frecuencia) [47]. Como resultado, la potencia de la señal óptica de cada canal varía considerablemente dentro del espectro MB (ver Figura 3.2). Esta distribución desigual de potencia influye tanto en el ruido ASE como en el NLI, lo que afecta finalmente el GSNR [33]. Por lo tanto, aunque el uso de bandas adicionales permite aumentar la capacidad al incorporar más canales, también reduce la distancia efectiva de transmisión en las bandas clave.

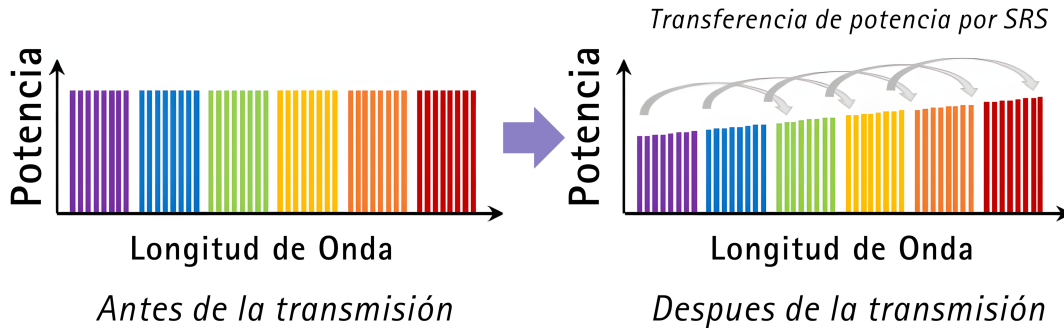


FIGURA 3.2: Esquema simplificado que muestra la transferencia de potencia entre señales ópticas de diferentes longitudes de onda [47].

La magnitud de este deterioro depende directamente de la cantidad de canales activos en cada banda. A medida que se activan más canales, el efecto adverso del SRS se intensifica, afectando la calidad de transmisión de otras bandas [31]. Para minimizar las complicaciones operativas, se suele considerar el peor escenario posible por canal en cada banda, lo cual evita la necesidad de recalcular continuamente el GSNR con cada cambio en la asignación del espectro [31].

Un ejemplo de la degradación interbanda se presenta en la Tabla 3.1, donde se ilustra el peor caso de GSNR por banda en una transmisión de 960 km, con spans de 80 km. A medida que se activan más bandas, se observa un deterioro progresivo del GSNR, especialmente en aquellas con mayor longitud de onda. Por ejemplo, la activación de la banda S reduce el GSNR de la banda L de 13,88 dB a 12,31 dB, y el de la banda C de 15,04 dB a 13,91 dB.

Escenario	Banda				
	L	C	S	E	O
Solo C	-	15,23	-	-	-
C+L	13,88	15,04	-	-	-
C+L+S	12,31	13,91	13,83	-	-
C+L+S+E	11,43	12,91	13,0	10,99	-
C+L+S+E+O	11,18	12,67	12,74	10,90	3,43

TABLA 3.1: Peor caso de GSNR (dB) por banda en un enlace de 960 km con spans de 80 km, evaluado en distintos escenarios [31].

Modelado de la capa física

La inclusión del efecto SRS y su impacto en la degradación interbanda requiere una adaptación del modelado de la capa física [31]. El cálculo del GSNR en sistemas MB demanda modelos más sofisticados, como el *Generalized Gaussian Noise* (GGN), que supera las limitaciones del modelo clásico *Gaussian Noise* (GN). El GGN incorpora una integral compleja que considera simultáneamente los parámetros de la fibra, el perfil de potencia de la señal y los efectos del SRS [51]. Sin embargo, incluso este modelo avanzado puede presentar imprecisiones en ciertos escenarios [31]. La complejidad de estos cálculos hace necesario el uso de herramientas avanzadas para la estimación de la calidad de transmisión (QoT-E) [34].

3.4.2. Hardware en Multi-Banda

Expandir el espectro requiere el desarrollo de nuevos amplificadores y componentes ópticos que operen eficientemente en las bandas adicionales. Si bien los sistemas actuales se centran en la integración de C+L aprovechando la tecnología EDFA para ambas bandas [51], un despliegue completo de MB necesitará amplificadores y filtros específicos para cada banda adicional [34]. La Tabla 3.2 detalla los amplificadores de fibra dopada (DFA) necesarios para la amplificación de cada banda, junto con sus respectivos materiales dopantes.

Parámetro	O	E	S	C	L
Tipo de Amplificación	PDFA	BDFA	TDFA	EDFA	EDFA
Material	Praseodimio	Bismuto	Tulio	Erbio	Erbio

TABLA 3.2: Tipos de amplificación y materiales dopantes para el rango de bandas de transmisión desde O hasta L [67].

3.4.3. Asignación de Recursos en Multi-Banda

Una de las ventajas de MB es el aumento significativo de la capacidad total de ancho de banda al añadir más canales WDM a la red. Un sistema MB con canales de 50 GHz puede soportar hasta 900 canales, aproximadamente diez veces más que los sistemas comerciales actuales [51]. Sin embargo, esta nueva capacidad aumenta la complejidad en la gestión de recursos.

Los algoritmos tradicionales de RWA, diseñados para sistemas de banda única, se limitan a seleccionar una ruta y asignar una longitud de onda específica. En redes MB, el problema se vuelve multidimensional al tener que considerar también la banda de operación. Esta complejidad adicional ha llevado al desarrollo de algoritmos de asignación de ruta, banda y longitud de onda (*Routing, Band and Wavelength Assignment*; RBWA) [68], que deben considerar tanto el alcance efectivo de cada banda como los requisitos específicos de cada conexión.

La utilización de super-canales añade una restricción adicional al problema, ya que estos canales deben ser contiguos en el espectro para garantizar una transmisión coherente. Esta condición de contigüidad incrementa aún más la complejidad de los algoritmos RBWA en la asignación de recursos. Además, en los sistemas DWDM modernos que incorporan flex-rate, se debe considerar el ajuste dinámico del FM según la distancia de la ruta.

3.5. Desafíos en EONs

Las EONs representan una evolución de las redes tradicionales, ofreciendo mayor flexibilidad y eficiencia en la utilización del espectro. A diferencia de las redes DWDM convencionales, donde los canales tienen un espaciado fijo de 50 GHz [25], las EONs emplean *Frequency Slot Units* (FSUs) o *slots*, con espaciados más granulares, típicamente de 12,5 GHz [25]. Esta granularidad se consigue mediante el uso de *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (OFDM) [26]. Los *slots* pueden combinarse para satisfacer los requerimientos específicos de cada conexión, optimizando el uso del espectro y permitiendo la transmisión de conexiones de alta capacidad [25].

Las características de las EON permiten eliminar la rigidez de fixed-grid, asignando a cada solicitud únicamente el espectro necesario para cumplir con la tasa de transmisión requerida [26]. Además, su integración permite maximizar las ventajas de flex-rate.

La implementación de EONs con FSUs de 12,5 GHz, en una red óptica con banda C, permite un aumento estimado del 35 % de capacidad [25]. Aunque este incremento es significativo, sigue siendo menor en comparación con el 100 % que ofrece MB con C+L. No obstante, en escenarios donde se combinan las bandas C+L, las EONs podrían ofrecer un rendimiento comparable al de sistemas C+L+X (donde X corresponde a una banda adicional), principalmente debido a los desafíos que presenta MB en términos de QoT. Esto posiciona a las EONs como una solución competitiva frente al problema del *capacity crunch*. Sin embargo, al igual que MB, la implementación de EONs conlleva nuevos desafíos que deben ser abordados, especialmente si consideramos un contexto C+L.

3.5.1. Asignación de recursos en EONs

El uso de slots ofrece mayor flexibilidad en la asignación de recursos, pero también introduce mayor complejidad en su gestión [25].

Routing and Spectrum Assignment

El clásico problema RWA de DWDM evoluciona al problema de enrutamiento y asignación de espectro (*Routing and Spectrum Assignment*; RSA) [1]. Ahora, no solo se debe encontrar una ruta, sino también un bloque contiguo de FSUs [26]. Esto añade una restricción adicional: la *contigüidad espectral*, además de la ya presente restricción de continuidad. En otras palabras, los slots asignados para cada conexión deben ser los mismos a lo largo del lightpath y deben estar contiguos entre sí. Esta restricción es similar a la que se presenta en el caso de los super-canales en RWA; sin embargo, en RSA, la contigüidad espectral aparece con mayor frecuencia y complejidad.

El objetivo de los algoritmos RSA es seleccionar una ruta y un bloque de slots para asignarlos a una demanda, cumpliendo con estas restricciones. El RSA se considera, por tanto, una combinación de dos problemas: la selección de la ruta (R) y la asignación del espectro (SA) [69].

La Figura 3.3 ilustra tres escenarios en una red óptica de 8 nodos y 13 enlaces bidireccionales con 6 slots cada uno. En la figura, se distinguen slots ocupados (en rojo), slots libres (en blanco) y slots candidatos para una nueva conexión (en azul). El análisis se centra en una solicitud de conexión entre los nodos F y C que demanda 3 slots. En el escenario 3.3a, el estado de la red permite una asignación exitosa al encontrar slots que cumplen tanto la restricción de continuidad como la de contigüidad. Los escenarios 3.3b y 3.3c cuentan con recursos suficientes para la conexión; sin embargo, en el primer caso no se puede satisfacer la restricción de continuidad, mientras que en el segundo no se cumple la restricción de contigüidad.

La complejidad computacional de resolver este problema, utilizando un algoritmo simple como *first-fit* (ver Sección 6.5), es de $\mathcal{O}(R \cdot SA)$. Esto significa que la complejidad de resolver el RSA aumenta exponencialmente con el número de rutas (R) y el número de slots por enlace (SA).

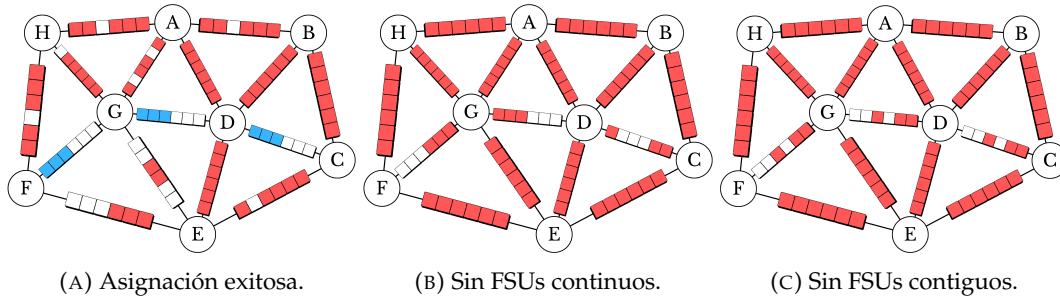


FIGURA 3.3: Red con 8 nodos, 13 enlaces de fibra bidireccionales, y cada enlace con 6 FSUs, representando tres escenarios distintos de intento de conexión entre los nodos F y C.

Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment

La integración de flex-rate potencia aún más las capacidades de las EONs al introducir el ajuste dinámico del FM para cada conexión. Esta característica evoluciona el problema RSA hacia el de enrutamiento, nivel de modulación y asignación del espectro (*Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment*; RMLSA) [39]. En este nuevo escenario, se debe seleccionar el FM adecuado en función de la longitud del lightpath candidato, añadiendo así una nueva dimensión al problema de optimización.

Dada la complejidad inherente del RSA, la incorporación de esta nueva dimensión aumenta la complejidad computacional a $\mathcal{O}(R \cdot ML \cdot SA)$. Esto implica que la complejidad de RMLSA crece exponencialmente con el numero de rutas, formatos de modulación (ML) y slots por enlace.

Routing, Modulation Level, Band and Spectrum Assignment

La asignación de recursos en EON ya presenta un alto grado de dificultad por sí misma. Sin embargo, al considerar su implementación en sistemas MB con C+L, el proceso se complejiza aún más.

En este contexto, el problema RMLSA evoluciona hacia el de enrutamiento, formato de modulación, banda y asignación del espectro (*Routing, Modulation Level, Band and Spectrum Assignment*; RMLBSA) [70]. De manera similar a lo que ocurría con RBWA, este nuevo paradigma incorpora la selección de banda como variable adicional, considerando su alcance efectivo y asegurando que el GSNR de la banda elegida cumpla con los requisitos mínimos del FM seleccionado [70].

La incorporación de esta nueva dimensión aumenta la complejidad computacional, la cual crece exponencialmente en función de la cantidad de rutas, FMs, bandas (B) y slots por enlace, resultando en una complejidad de $\mathcal{O}(R \cdot ML \cdot B \cdot SA)$.

Fragmentación Espectral

La fragmentación del espectro es otro desafío significativo que surge debido a la naturaleza granular de las EONs. En escenarios de tráfico dinámico, a medida que se establecen y liberan conexiones, el espectro puede fragmentarse en pequeños bloques no utilizables para nuevas solicitudes, reduciendo la eficiencia en el uso de recursos [71]. La Figura 3.4 ilustra visualmente este fenómeno, donde se muestra el estado de un enlace en distintos momentos de tiempo.

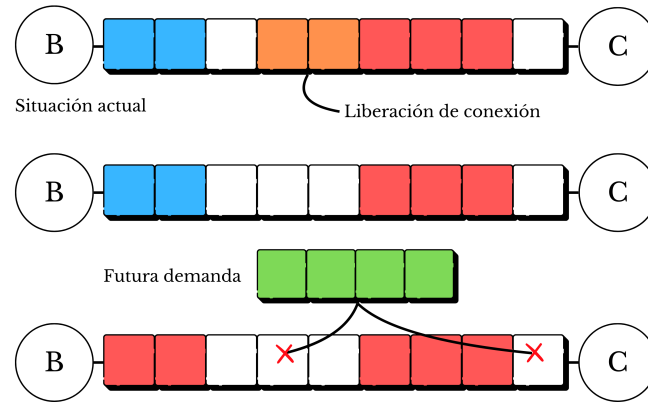


FIGURA 3.4: Representación Gráfica de la Fragmentación y su Impacto en la Asignación de Conexiones.

En la parte superior de la Figura 3.4, se presenta el estado inicial, donde los segmentos de diferentes colores (azul, naranja y rojo) representan conexiones actualmente asignadas en la red. Más adelante, en la sección central, los recursos previamente ocupados por el segmento naranja son liberados, quedando disponibles para futuras conexiones. En un momento posterior, una nueva conexión, representada en verde, solicita recursos. Aunque el espacio libre total es suficiente para satisfacer esta solicitud, la fragmentación impide su asignación debido a la falta de contigüidad. Esta representación resalta la importancia de una gestión eficiente del espectro, orientada a minimizar la fragmentación y optimizar la asignación de recursos en los sistemas ópticos.

En la literatura académica se proponen múltiples métodos para mitigar este desafío. Sin embargo, los operadores suelen evitar abordarlo debido a que implica costos adicionales y potenciales interrupciones en la operación de la red [25].

3.5.2. Hardware en EONs

Al igual que en MB, el uso de EONs requiere nuevo hardware [1]. En primer lugar, es necesario adaptar los transpondedores a la flexibilidad de las EONs mediante transpondedores de ancho de banda variable y divisibles (*Sliceable Bandwidth Variable Transponders*, SBVTs). La principal ventaja de los SBVTs radica en su capacidad para ajustarse a diferentes tasas de bits, modificando el FM y el uso de ancho espectral según el alcance óptico y la granularidad de las EONs [26]. Además, es indispensable actualizar los ROADMs, equipándolos con switches de espectro flexible (Flex WSSs) [20].

3.6. Necesidad de investigación

Con la inminente llegada del capacity crunch, el uso de MB con configuración C+L se plantea como el siguiente paso lógico en la evolución de las redes ópticas. No obstante, la decisión sobre cuál dirección tomar tras la adopción de la banda L sigue siendo una pregunta abierta [33].

Aunque esta transición representa un gran salto en términos de capacidad y eficiencia de la red, la continua y acelerada expansión del tráfico en las últimas décadas exige anticipar y prepararse para los desafíos futuros. Por ende, la siguiente pregunta que la academia debe hacerse es: ¿dónde se deben enfocar los esfuerzos?, ¿agregar una nueva banda a la configuración C+L o migrar hacia EONs? La respuesta no es sencilla, ya que son múltiples los factores involucrados, tales como costos, consumo energético, espacio físico, fiabilidad, rendimiento, capacidad de red, tiempo de despliegue y mantenimiento [25].

Esta tesis busca abordar precisamente esta pregunta. Se pretende determinar si, en términos de probabilidad de bloqueo y capacidad de la red, resulta más beneficioso adoptar EONs en una configuración C+L o continuar expandiendo MB añadiendo una nueva banda. El análisis se enfoca en redes troncales y regionales que, además de manejar grandes volúmenes de tráfico a lo largo de distancias considerables, suelen ser pioneras en la adopción de nuevas tecnologías de transmisión. En el caso de EONs se consideran canales de 12,5 GHz y 6,25 GHz. Para MB, los avances más recientes sugieren que las próximas bandas candidatas para la expansión son la banda S y la banda E, por lo que serán el foco de este análisis.

Dada la evolución tecnológica previamente observada, se podría anticipar que la ventaja que presenta MB con configuración C+L frente a EONs en la banda C podría extrapolarse en futuros desarrollos. Esto implicaría que una configuración extendida, como C+L+X, donde X representa una nueva banda, podría superar en rendimiento a las EONs en una configuración C+L. Sin embargo, como se ha expuesto previamente, la decisión no es trivial.

Capítulo 4

Estado del Arte

Este capítulo examina los avances más recientes en las tecnologías MB y EONs, organizando la discusión en tres ejes principales: desarrollos específicos en MB, avances en EON y estudios que integran ambas tecnologías.

4.1. Avances en tecnologías Multi-Banda

4.1.1. Innovaciones en hardware

El desarrollo de hardware para sistemas que combinan las bandas C y L han sido significativos, e incluso ya cuenta con implementaciones comerciales [65]. No obstante, para bandas más allá de la L, aún persisten importantes desafíos. Por ejemplo, las soluciones para la amplificación óptica continúan presentando dificultades en términos de fabricación a gran escala y fiabilidad para su despliegue comercial [33]. Asimismo, el desarrollo insuficiente de otros componentes esenciales, como los transpondedores, ha restringido la implementación de configuraciones extendidas [72].

En este contexto, una investigación realizada por Hoshida et al. [47] recopila diversos estudios que reportan el ancho de banda alcanzado con tecnologías MB de manera experimental. Todos los estudios analizados demuestran haber logrado anchos de banda superiores a 9 THz—en comparación con los 4,4 THz de la banda C—empleando diversas configuraciones MB. Entre estos trabajos destaca el de [73], en el cual, utilizando las bandas S, C y L, se alcanzó un ancho espectral de 17,25 THz. Sin embargo, este valor aún está lejos del potencial total de las bandas disponibles, que alcanza los 59 THz. Este estudio revela que, actualmente, solo se ha utilizado experimentalmente un tercio de la ventana de baja pérdida de estas bandas [47].

Para superar las limitaciones en el desarrollo de dispositivos ópticos, Emmerich et al. [72] proponen una solución innovadora: la adaptación de receptores ópticos basados en la banda C para su uso en otras bandas. Esta estrategia, que evita el diseño de receptores específicos para cada banda, ha permitido caracterizar receptores comerciales que cubren desde la banda E hasta la U, alcanzando un ancho de banda de 25,4 THz. Este enfoque representa una alternativa económicamente viable para la expansión de redes MB.

En cuanto a las arquitecturas de red, un análisis reciente [74] evalúa cuatro configuraciones de nodos para implementaciones C+L+S, considerando la capacidad total y el costo por bit. Los resultados sugieren que la reutilización de componentes de la banda C es la opción más económica a corto plazo. Sin embargo, esta arquitectura muestra limitaciones en escenarios con mayor degradación física, resultando en menor capacidad total y mayor costo por bit. Las arquitecturas con capacidad de

intercambio entre bandas (*band switching*) se perfilan como una solución más prometedora a futuro, al optimizar el uso de componentes y mejorar el rendimiento mediante tecnología compatible entre bandas.

Los avances también se extienden a otras bandas ópticas, como la banda O, donde se han logrado transmisiones de hasta 1,6 Tb/s en distancias cortas (2-10 km) [75]. Paralelamente, emerge como alternativa el uso de fibras de núcleo hueco (*hollow-core fiber*, HCF) en lugar de la fibra G.652.D convencional [76]. Las HCF prometen un amplio ancho de banda con atenuación comparable a la fibra tradicional en banda C, además de mejores características en términos de dispersión, NLI y SRS [77]. Sin embargo, esta tecnología se encuentra en etapas tempranas de desarrollo [47] y enfrenta desafíos similares a las redes SDM, requiriendo una renovación completa de la infraestructura de fibra existente.

4.1.2. Estrategias de implementación

La implementación de MB más allá de las bandas C+L representa un proceso gradual y a largo plazo [33]. Este proceso plantea tres preguntas fundamentales: cómo, cuáles y en qué orden se deben incorporar las nuevas bandas para expandir el espectro disponible. La literatura ha abordado estas interrogantes proponiendo diversas estrategias de crecimiento progresivo, conocidas como “pay-as-you-grow” (invertir a medida que se crece) [78].

Una estrategia innovadora propuesta en [33] es la denominada *performance-prediction*, que ha demostrado ventajas significativas sobre los enfoques convencionales como *near-to-far* y *far-to-near*. La evaluación basada en capacidad alcanzable señala que la banda E debería ser la primera en implementarse, ya que ofrece un incremento sustancial en la capacidad de transmisión con una inversión relativamente modesta en amplificadores. Siguiendo este criterio, se propone un orden de actualización: E, O, S y U. Los análisis de costos indican que la implementación de todas estas bandas podría triplicar la capacidad disponible en comparación con la configuración C+L.

Para distancias regionales o troncales, las investigaciones demuestran que un sistema MB puede alcanzar rendimientos superiores a 200 Tb/s por fibra. En términos comparativos, un sistema MB completo (de banda O a L) puede transportar aproximadamente 8-10 veces más tráfico que la banda C en solitario, y 2.5-3 veces más que la configuración C+L. Para optimizar el rendimiento en estas implementaciones, se recomienda el uso de técnicas como la intercalación de señales y el bombeo Raman [51].

En cuanto a la secuencia óptima de implementación, un trabajo en [79] compara las ventajas de expandir hacia las bandas E o S, evaluando su impacto en la capacidad y los efectos del SRS. Los resultados sugieren que, aunque ambas bandas ofrecen un aumento comparable en la capacidad soportada, la banda E, con 14 THz de separación entre las bandas C y E, es preferible para evitar interferencias en los canales activos de C+L, haciendo que la actualización hacia la banda E sea la más efectiva en comparación con la banda S.

Una propuesta reciente [43] explora la división de la banda S en dos sub-bandas (S1 y S2), alcanzando un ancho espectral total de 20 THz (S2 + S1 + C + L). Sin embargo, se aclara que la adopción de una solución MB depende en gran medida del costo de la fibra y de los amplificadores para la banda S, así como de la capacidad de red requerida. En escenarios donde se dispone de fibras adicionales o los costos

asociados a la fibra son reducidos, un sistema limitado a la banda C resulta ser la opción más económica. A medida que los costos de la fibra aumentan, las bandas adicionales se tornan más atractivas, avanzando desde un sistema C hacia C+L, y posteriormente hacia configuraciones que incluyen una fracción de la banda S ($S1 + C + L$) o la banda S completa ($S2 + S1 + C + L$). No obstante, se señala que las bandas S1 y S2 presentan un rendimiento óptico inferior, lo que las hace más adecuadas para trayectos de corta distancia. Por lo tanto, operar la banda S en lightpaths de un único enlace y simplificar la arquitectura del ROADM podría ser ventajoso. Los resultados también sugieren que la utilización de bandas desde la L hasta la O es poco probable, debido al bajo rendimiento óptico en bandas alejadas a C y L. Además, la actualización completa de la red a un sistema MB podría no ser económicamente viable si la capacidad ofrecida no resulta necesaria.

4.1.3. Asignación de recursos

La asignación de recursos en sistemas MB tradicionalmente se ha basado en considerar el peor caso de GSNR por banda [31]. No obstante, la literatura reciente propone estrategias más sofisticadas que consideran la ocupación espectral real del sistema, alejándose así del enfoque conservador convencional. En [80], se introduce un modelo que evalúa los beneficios de capacidad asociados con la estimación de GSNR, considerando el estado actual de ocupación espectral, en contraste con la suposición del peor caso con espectro completamente ocupado. Esta aproximación ha demostrado proporcionar mayores beneficios de capacidad en redes pequeñas, aunque su impacto se reduce significativamente en redes de mayor escala.

El menor alcance efectivo de las bandas alternativas ha motivado investigaciones sobre diferentes estrategias de priorización de bandas durante la asignación de recursos. En escenarios C+L con flex-rate, [31] demuestra que priorizar la banda L puede resultar beneficioso para optimizar el uso de FMs de alto nivel. Esto se debe a que existen rutas donde, por ejemplo, la modulación PM-16QAM es viable en la banda C pero no en la banda L, dado el inferior rendimiento óptico de esta última. En consecuencia, si se prioriza la banda C, esta puede saturarse rápidamente con conexiones que pudieron haber sido asignadas en la banda L, lo que forzaría el uso de FM menos eficientes (como PM-QPSK) en la banda L para las conexiones restantes.

La priorización de la banda C puede resultar contraproducente, ya que su rápida saturación podría forzar el uso de FMs menos eficientes, como PM-QPSK, en conexiones que podrían haber aprovechado PM-16QAM en la banda C.

Profundizando en esta línea, [70] presenta una familia de algoritmos de asignación de recursos para diferentes configuraciones MB (C+L+S+E, C+L+S y C+L). En estos algoritmos, el orden de priorización de las bandas se define dinámicamente considerando tanto las características específicas de las conexiones (longitud de ruta y bit rate) como las propiedades de las bandas (capacidad, alcance y balance). Los resultados demuestran que esta estrategia de priorización adaptativa logra mejoras sustanciales en métricas como el BP, en comparación con esquemas de priorización estática.

La precisión en la estimación de QoT resulta fundamental para el desarrollo efectivo de estas heurísticas, especialmente en entornos donde los efectos físicos son críticos. La biblioteca de simulación GNPY [81] se ha establecido como una herramienta valiosa para la evaluación de QoT en escenarios MB. Su fiabilidad ha sido validada experimentalmente en transmisiones MB C+L [82], incluyendo la implementación

del modelo GGN descrito en la Subsección 3.4.1. Los autores en [83] también demuestran la capacidad de GNPY para abordar las degradaciones características de transmisiones MB de larga distancia en configuraciones C+S, confirmando la precisión de sus estimaciones. Sin embargo, es importante señalar que la versión estable de GNPY mantiene soporte oficial únicamente para la banda C, estando pendiente la incorporación oficial de funcionalidades MB.

Complementariamente, han surgido aproximaciones basadas en inteligencia artificial (IA) para la estimación de QoT [84], [85]. Estas técnicas han mostrado resultados particularmente prometedores en escenarios con datos limitados. Por ejemplo, mediante técnicas de *domain adaptation*, que permiten transferir conocimiento desde simulaciones a entornos reales, se han logrado estimaciones precisas utilizando apenas 8 muestras de datos de red, superando el rendimiento de redes neuronales convencionales entrenadas con 300 muestras. Si bien estos métodos ofrecen ventajas en eficiencia computacional y requisitos de datos de entrenamiento, enfrentan limitaciones importantes relacionadas con la necesidad de datos específicos para cada topología y configuración de hardware, así como su dependencia de la calidad y representatividad de los datos disponibles. A pesar de estas restricciones, estas técnicas se perfilan como una alternativa valiosa a los modelos analíticos tradicionales, especialmente en contextos donde la obtención de datos resulta costosa o limitada.

4.2. Avances en tecnologías EONs

Las EONs han alcanzado un nivel de madurez tecnológica significativo desde su introducción en 2008 [86]. Esta sección analiza sus desarrollos recientes en hardware, estrategias de implementación y técnicas de gestión de recursos.

4.2.1. Innovaciones en hardware

La madurez tecnológica alcanzada por las EONs se refleja en la actual disponibilidad de hardware programable y flexible [87], posicionándolas como una alternativa viable para la evolución de redes existentes. Esta madurez contrasta significativamente con las soluciones MB más allá de la banda L, que continúan enfrentando importantes desafíos técnicos. Un hito fundamental en la evolución de las EONs ha sido la estandarización por parte de la ITU-T del espaciado de canal de 12.5 GHz [46], que junto con el desarrollo sustancial de BVTs [21], ha establecido las bases tecnológicas para implementar redes verdaderamente flexibles y programables. La arquitectura de estos BVTs, documentada detalladamente en el proyecto IDEALIST [88], proporciona el marco técnico necesario para materializar esta flexibilidad.

Las investigaciones recientes se han enfocado en optimizar el rendimiento de estos sistemas. Un estudio significativo [89] demuestra que la maximización de la eficiencia espectral en EONs requiere operar con bit rates intermedios. Esta aproximación permite alcanzar un equilibrio óptimo entre las penalizaciones causadas por las imperfecciones de los transceptores y el filtrado de la señal, resultando en un aprovechamiento más eficiente del espectro disponible.

Una innovación notable en el campo de los componentes ópticos es la propuesta de un Multiplexor de Adición/Extracción por Constelación (CADM) como alternativa al ROADM tradicional [90]. Este nuevo diseño ofrece mayor precisión en la gestión de señales ópticas, mejorando tanto la flexibilidad como la eficiencia espectral del sistema. La propuesta implementa el FM QPSK para descomponer y modificar

señales 16-QAM, permitiendo operaciones de add y drop más precisas en un entorno completamente óptico, eliminando la necesidad de conversiones al dominio eléctrico.

El incremento en la cantidad de bits transmitidos por símbolo representa un factor crucial para alcanzar mayores tasas de datos dentro de un ancho de banda fijo [91]. En este aspecto, los FM de la familia QAM han experimentado avances significativos en eficiencia. Mientras que la industria actual utiliza principalmente formatos de 8QAM o 16QAM, la investigación académica ha logrado demostrar experimentalmente la transmisión exitosa de señales en 65 536-QAM [92], marcando un notable progreso en la capacidad de transmisión de datos.

4.2.2. Actualización de la red hacia EON

A pesar de los avances en hardware, la implementación de EONs en infraestructuras existentes plantea desafíos significativos de optimización debido a la complejidad inherente de gestionar múltiples variables simultáneamente. Estas variables incluyen el ruteo, los FMs, la asignación de espectro, el monitoreo de la red y la configuración de dispositivos [93]. Para abordar esta complejidad, las Redes Definidas por Software (SDN) emergen como una solución prometedora al proporcionar una gestión centralizada que facilita la orquestación coordinada de los planos de datos, control y gestión.

Un análisis detallado presentado en [93] examina los desafíos técnicos asociados a la implementación de redes SDN basadas en EONs. Los resultados sugieren que esta arquitectura puede superar las limitaciones inherentes a las soluciones tradicionales. Sin embargo, el estudio también revela que, al momento de la investigación, la adopción de este nuevo paradigma por parte de los operadores de telecomunicaciones no era generalizada.

Desde la perspectiva económica, investigaciones como la presentada en [86] demuestran la viabilidad financiera de las EONs. El estudio, realizado sobre topologías realistas a nivel nacional, evidencia que la inversión en dispositivos flexibles puede resultar rentable tanto a corto como a mediano plazo, siempre que se optimicen parámetros críticos como la granularidad del espectro y la carga de tráfico. Los resultados muestran ahorros significativos en CAPEX a través de todos los escenarios evaluados.

Finalmente, un caso de estudio se presenta en [94], donde se analiza la oportunidad de implementación de EONs en la red de Burundi Backbone. Este estudio enfatiza la sinergia entre EONs y SDN como factor clave para mejorar la capacidad y eficiencia espectral de la red. Adicionalmente, destaca dos aspectos cruciales para una implementación exitosa: la gestión cuidadosa del tráfico y la selección apropiada de dispositivos flex-grid, específicamente ROADMs que soporten las bandas C y L, presumiblemente para su posterior expansión a configuraciones MB.

4.2.3. Avances en la asignación de recursos y la fragmentación

La asignación eficiente de recursos en las EONs representa un área de investigación activa, donde se han propuesto diversas soluciones para optimizar el uso del espectro y minimizar la fragmentación.

Técnicas avanzadas en la asignación de recursos

Las metodologías RSA han experimentado una evolución significativa en los últimos años. El análisis comprehensivo realizado por Bogado-Martínez et al. [69] revela que, para peticiones individuales, la estrategia first-fit predomina en un 54 % de los casos estudiados, debido a su efectividad y bajo costo computacional. Entre las propuestas innovadoras destaca el enfoque de *Advance Reservation* [95], que permite retrasar el establecimiento de conexiones para optimizar la asignación de recursos, en lugar de establecerlas inmediatamente. En esta línea, un estudio reciente [59] implementa un sistema de cola para gestionar conexiones no asignadas inmediatamente, demostrando una reducción significativa del BP en escenarios de baja carga de tráfico, aunque presenta desafíos en términos de QoS.

Las técnicas de machine learning y meta-heurísticas, aunque prometedoras, representan campos emergentes con solo 8 % y 16 % respectivamente de los trabajos analizados en [69]. Un ejemplo destacado es el modelo “3S” [96], que integra capacidades de autoadaptación, autoconciencia y autogestión mediante IA, combinando pronósticos de tráfico con análisis del estado de la red para abordar desafíos desde el control adaptativo de EDFAs hasta la gestión automática de recursos y fallos.

Enfoques híbridos también han demostrado ser efectivos. En [97] se presenta una estrategia que combina ILP con algoritmos RSA para optimizar la colocación de WSS y la asignación de recursos, considerando efectos físicos en la interferencia de señales. Esta aproximación logra minimizar el hardware necesario mientras mantiene una utilización eficiente del espectro.

Gestión de la fragmentación

Para enfrentar la fragmentación del espectro, en la literatura se han desarrollado diversas estrategias de asignación que se pueden clasificar en dos tipos según el tipo de enfoque: proactivas y reactivas [25].

Las soluciones proactivas buscan prevenir la fragmentación antes de que ocurra, mediante técnicas que consideran el estado del espectro durante la planificación y asignación de recursos. Por ejemplo, el trabajo de [71] introduce el algoritmo *Fragmentation Aware RSA* (FA-RSA). A diferencia de métodos convencionales, el FA-RSA evalúa las rutas tanto en términos de distancia como en función de la fragmentación actual antes de asignar los recursos, logrando así un mejor uso del espectro y una reducción del BP.

Por otra parte, las soluciones reactivas abordan la fragmentación después de su aparición, corrigiendo y reestructurando el espectro según las necesidades operativas. En [98] se presentan algoritmos de desfragmentación reactiva, incluyendo un enfoque híbrido que utiliza ambas técnicas. Este método lleva a cabo una consolidación periódica del espectro y aplica desfragmentación reactiva en caso de ser necesario, logrando así un rendimiento superior respecto a métodos convencionales.

En desarrollos recientes, el algoritmo *Fragmentation Aware Topology Aware RMSA* (FA-TA-RMSA) [99] introduce un enfoque que integra características de la topología, en particular, la centralidad de los enlaces, como criterio en la asignación de recursos. Esta innovación permite una gestión precisa de la fragmentación y una reducción significativa del BP, al tiempo que optimiza el uso del espectro.

4.3. Integración entre MB y EONs

En los últimos años, diversos estudios han abordado los desafíos técnicos y operativos que implica la integración de EON y MB, proponiendo soluciones innovadoras para facilitar la transición entre ambas tecnologías. Sin embargo, en la literatura analizada, todos los trabajos consideran las EONs como base tecnológica desde la cual evolucionar hacia MB, sin explorar, por ejemplo, la posibilidad de una transición inversa (de MB a MB-EONs).

El trabajo presentado en [100] propone *Progressive Optics Deployment and Integration for Growing Yields* (PRODIGY+), una estrategia para facilitar la migración progresiva desde EONs en banda C hacia configuraciones MB-EONs y redes SDM basadas en fibras multi-núcleo. Esta solución se inspira en el modelo *Swiss Cheese* e implementa medidas proactivas que aseguran la robustez de la red frente a picos de tráfico, garantizando el cumplimiento de los acuerdos de nivel de servicio. El enfoque de actualización escalonada de PRODIGY+ permite una transición fluida y no disruptiva, optimizando objetivos tanto operativos como económicos ante el crecimiento dinámico del tráfico.

Una aproximación alternativa se presenta en [101], donde se propone una actualización parcial de la red para explotar la banda L sin requerir una conversión total a MB. Esta estrategia identifica selectivamente las fibras a actualizar, limitando el número de amplificadores EDFA que requieren reemplazo, y evalúa el impacto de esta mejora en el rendimiento de la red ante tráfico dinámico. Los resultados demuestran que la actualización del 60 % de los EDFAs permite aumentar el volumen de tráfico soportado entre un 175 % y un 322 % en comparación con redes sin optimización.

En el ámbito de asignación de recursos, el algoritmo RMLBSA propuesto en [102] presenta una estrategia que considera tanto la QoT como la fragmentación en MB-EONs. Este enfoque reduce la fragmentación y disminuye la tasa de bloqueo de servicios hasta en un 33.2 % comparado con algoritmos tradicionales. Además, optimiza la utilización del espectro mediante la asignación de FMs de orden superior en la banda C, mitigando el impacto del SRS en bandas C+L [90]. Estas mejoras resultan en una reducción significativa del BP, un uso más eficiente del espectro y un mayor GSNR promedio en la red.

Finalmente, dado el considerable impacto del efecto de SRS en las redes MB, el estudio de [90] introduce un algoritmo de asignación orientado a reducir este efecto en las bandas C+L. Durante la fase de ruteo, el algoritmo selecciona enlaces con menores recursos espectrales ocupados y rutas más cortas para reducir la degradación de la calidad de la transmisión. Adicionalmente, asigna solicitudes de mayor orden de modulación a la banda C y centraliza las solicitudes que requieren más slots, mitigando así el impacto del SRS. Los resultados de simulación revelan que esta propuesta disminuye significativamente el BP, optimiza la utilización del espectro y mejora el GSNR promedio, proporcionando un mejor desempeño general de la red.

4.4. Brecha de investigación

Del análisis de la literatura presentada en este capítulo, se pueden identificar tres brechas significativas en la investigación actual sobre tecnologías MB y EONs.

En primer lugar, existe una ausencia de estudios comparativos entre MB en configuración extendida (C+L+S/E) y EONs en configuración C+L. Los trabajos actuales

analizan estas tecnologías de manera aislada, o asumen la adopción previa de EONs como base para la evolución hacia MB, como se observa en [100], [101].

Por otra parte, existe una falta de consenso respecto a la estrategia óptima de expansión de bandas después de la L. Mientras que algunos estudios favorecen a la banda E como primera opción de actualización [33], [79], otros sugieren priorizar la banda S [43], [51]. Estas diferencias señalan la necesidad de realizar evaluaciones más exhaustivas que consideren múltiples configuraciones bajo condiciones comparables.

La tercera brecha se centra en los estudios de asignación de recursos. Si bien existen numerosas investigaciones tanto para MB como para EONs, estas emplean diferentes condiciones de evaluación, variando métricas, topologías y características de tráfico. Esta heterogeneidad en las metodologías dificulta una comparación objetiva del rendimiento entre ambas tecnologías, especialmente en términos de capacidad y probabilidad de bloqueo.

Estas brechas fundamentan la necesidad de realizar un estudio comparativo sistemático que permita evaluar objetivamente el rendimiento de ambas tecnologías bajo condiciones estandarizadas de evaluación.

Capítulo 5

Hipótesis y objetivos

5.1. Hipótesis

El uso de MB en una configuración extendida C+L+S/E, con fixed-grid, ofrece un mayor incremento en la capacidad de la red y una menor probabilidad de bloqueo en comparación con las EONs en una configuración C+L.

5.2. Objetivos

5.2.1. Objetivo General

Comparar, mediante simulación, el desempeño de MB en una configuración extendida C+L+S/E con el de EONs en una configuración C+L, en términos de capacidad y probabilidad de bloqueo, bajo escenarios de tráfico dinámico e incremental.

5.2.2. Objetivos Específicos

1. Definir topologías, algoritmos y las características de la demanda de tráfico para los escenarios a simular.
2. Evaluar la probabilidad de bloqueo y la capacidad de MB en C+L+E/S, mediante simulación, considerando las topologías, escenarios de tráfico y algoritmos seleccionados.
3. Evaluar la probabilidad de bloqueo y la capacidad de las EONs en C+L, mediante simulación, considerando las topologías, escenarios de tráfico y algoritmos seleccionados.
4. Analizar y comparar los resultados obtenidos en cada escenario.
5. Preparar y enviar los resultados a una conferencia o revista del área.

Capítulo 6

Metodología

En este capítulo se detalla la metodología utilizada para evaluar y comparar los escenarios propuestos. Se incluyen las topologías, los perfiles de tráfico, algoritmos, métricas, entre otros aspectos relevantes que componen el marco de evaluación.

6.1. Diseño experimental

Para llevar a cabo el análisis, se consideraron tres tecnologías, centrales en la pregunta de investigación de esta tesis: EONs en MB con bandas C+L, DWDM en MB con bandas C+L+S y DWDM en MB con bandas C+L+E. Su comparación se realizó de manera sistemática a través de múltiples escenarios combinando parámetros fijos y variables.

Los parámetros fijos corresponden a los perfiles de tráfico predefinidos, manteniendo los mismos bit rates y FM para todos los escenarios. Esto permite realizar una comparación consistente entre las diferentes tecnologías evaluadas. Los parámetros variables incluyen las topologías de red, los tipos de tráfico (dinámico o estático) y los algoritmos de asignación de recursos. En el caso específico de EONs, también se considera la variación en la granularidad de los canales.

La Figura 6.1 presenta un esquema que sintetiza los componentes principales de este capítulo. El proceso inicia con la selección de una tecnología base, la cual se simula sobre una topología utilizando los perfiles de tráfico previamente definidos. Para cada configuración, se evalúan escenarios con tráfico dinámico e incremental mediante distintos algoritmos de asignación. El desempeño de cada escenario se mide a través de métricas específicas. Estos aspectos se detallan en profundidad en las secciones subsiguientes de este capítulo.

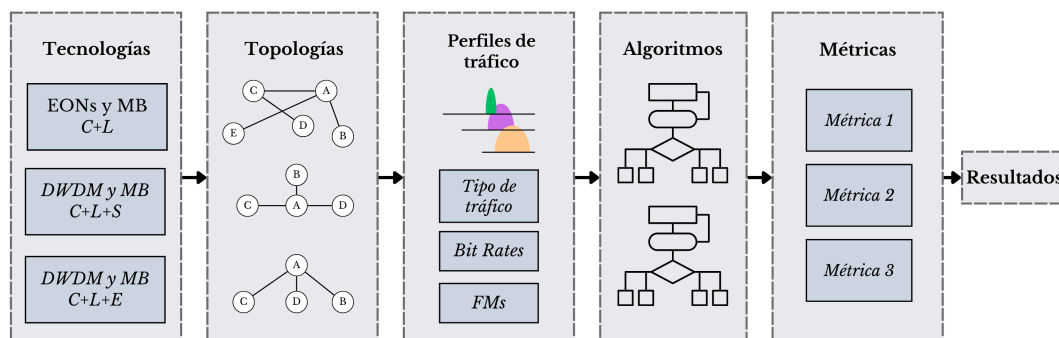


FIGURA 6.1: Resumen de la metodología aplicada.

6.2. Topologías

La selección de las topologías de red constituye un aspecto esencial para asegurar tanto la validez como la generalización de los resultados obtenidos en este estudio. Por esta razón, se establecieron tres criterios para su selección: (1) amplia presencia y validación en la literatura científica, (2) diversidad en términos de conectividad y densidad de enlaces, y (3) variabilidad en escalas de distancia que abarquen desde redes troncales hasta redes regionales. Bajo estos criterios, se seleccionaron tres topologías representativas: *National Science Foundation Network* (NSFNet), *United Kingdom Network* (UKNet) y *European Core Network* (EuroCore).

La NSFNet (Figura 6.2) representa una red de gran escala que abarca amplias distancias geográficas. Su estructura cuenta con 14 nodos y 22 enlaces, donde el enlace más largo alcanza los 4800 km, y la distancia promedio entre enlaces es de aproximadamente 1936 km, lo que la caracteriza como una red troncal de largo alcance.

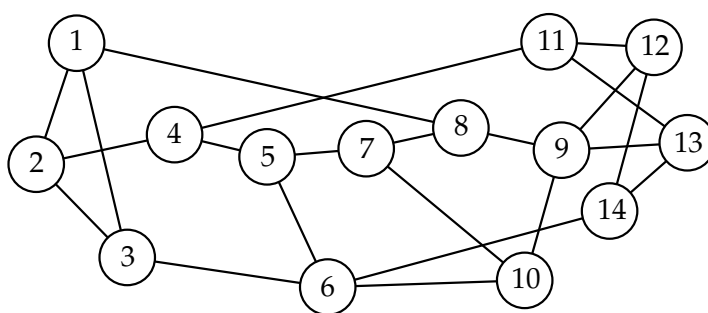


FIGURA 6.2: Topología de la National Science Foundation Network.

Además de su extensión geográfica, la NSFNet presenta una densidad de 0,242, lo que indica un número limitado de rutas alternativas. Esto implica que, en caso de saturación o falla de un enlace crítico, las opciones para redirigir el tráfico son restringidas, afectando potencialmente la resiliencia de la red.

La UKNet (Figura 6.3), por su parte, está compuesta por 21 nodos y 39 enlaces, con una densidad de red de 0,186. Este valor indica una cantidad de rutas alternativas aún más limitada en comparación con la NSFNet, lo que sugiere que, aunque existen suficientes enlaces para asegurar la conectividad general, la red podría enfrentar limitaciones en términos de resiliencia frente a situaciones donde se requieran rutas alternativas. La distancia promedio entre enlaces en la UKNet es de 138,21 km, lo cual refleja un diseño adecuado para operar en áreas geográficas más concentradas. La inclusión de la UKNet en este análisis permite evaluar el rendimiento de ambas tecnologías en escenarios de corto alcance, donde se podría maximizar la eficiencia de los FMs de alto nivel.

La EuroCore (Figura 6.4) se distingue por su alta densidad de 0,455, la mayor entre las topologías seleccionadas. Con 11 nodos y 25 enlaces, esta red presenta una estructura altamente conectada que facilita la implementación de rutas alternativas, incrementando la resiliencia general del sistema. La distancia promedio entre enlaces es de 425 km, ubicándola en un punto intermedio entre NSFNet y UKNet. Este diseño permite analizar el comportamiento de la red en un contexto con alta conectividad y distancias intermedias.

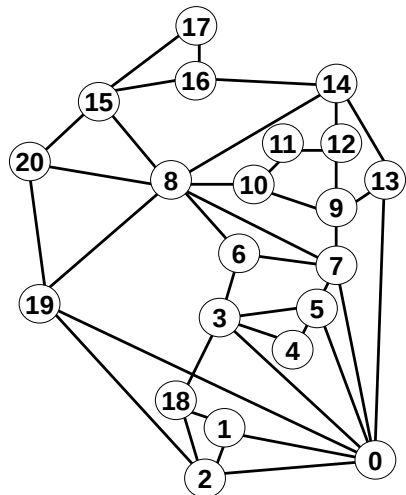


FIGURA 6.3: Topología de la United Kingdom Network.

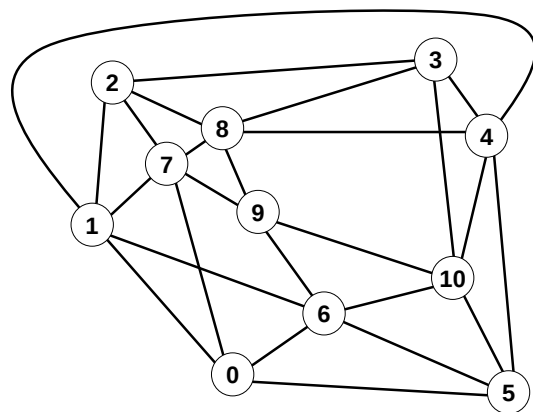


FIGURA 6.4: Topología de la European Core Network.

La Tabla 6.1 resume los parámetros característicos de cada red, incluyendo el número de nodos y enlaces, las distancias, el grado nodal promedio y la densidad.

Parámetros	Topología		
	NSFNet	UKNet	EuroCore
Numero de nodos	14	21	11
Numero de enlaces	22	39	25
Enlace más corto [km]	300	11	163
Enlace más largo [km]	4800	463	875
Largo promedio de enlace [km]	1936,36	138,21	425,6
Distancia total de la red [km]	42 600	5 390	10 640
Grado nodal promedio	3,14	3,71	4,55
Densidad	0,242	0,186	0,455

TABLA 6.1: Parámetros de las topologías de red utilizadas.

6.2.1. Componentes ópticos de la red

En las topologías seleccionadas, cada enlace presenta una capacidad de transmisión homogénea, es decir, todos los enlaces operan bajo las mismas condiciones de capacidad. Estos están compuestos por dos fibras unidireccionales ITU-T G.652.D, habilitadas para transmisión en MB, una fibra para cada dirección de la señal.

Respecto a los dispositivos ópticos, como WSS, ROADM, transpondedores MB y EON, se asume que cada nodo en la red cuenta con los componentes necesarios para satisfacer la demanda de tráfico. Esto implica que los bloqueos en la red serán resultado exclusivamente de congestión espectral y no de limitaciones de hardware en un nodo específico. Esta distinción es relevante, ya que el objetivo de esta tesis no es optimizar la configuración de cada nodo, sino analizar el rendimiento de la red de manera generalizada.

6.3. Canales de transmisión

En base a las características específicas de cada banda y los escenarios propuestos, se definieron los canales de transmisión que determinan la capacidad de ancho de banda para cada escenario. La Tabla 6.2 presenta el número de canales disponibles por banda para las simulaciones, considerando tanto el esquema flex-grid (6,25 GHz y 12,5 GHz) como fixed-grid (50 GHz). Esta distribución de canales se encuentra aliñada con lo propuesto en [103].

TABLA 6.2: Cantidad de canales por banda con espaciados de 6,25 GHz, 12,5 GHz y 50 GHz [103].

Banda	Nº de canales de 6,25 GHz	Nº de canales de 12,5 GHz	Nº de canales de 50 GHz
L	960	480	120
C	688	344	86
S	-	-	190
E	-	-	284

A partir de estos parámetros, la Tabla 6.3 resume la cantidad total de canales y el ancho de banda correspondiente para cada escenario de simulación, considerando C+L en flex-grid y C+L+S/E en fixed-grid.

TABLA 6.3: Cantidad total de ancho de banda por escenario

Escenario	Espaciado (GHz)	Nº de canales total	Ancho de banda (THz)
C+L	6,25 GHz	1648	$\approx 10,3$ THz
C+L	12,5 GHz	824	$\approx 10,3$ THz
C+L+S	50 GHz	396	$\approx 19,8$ THz
C+L+E	50 GHz	490	$\approx 24,5$ GHz

6.4. Perfiles de Tráfico

La selección de topologías y caracterización de los canales de transmisión constituye solo una parte del proceso de simulación. Es igualmente fundamental definir perfiles de tráfico que representen con precisión las demandas reales de la industria. La definición apropiada de estos perfiles garantiza que los resultados obtenidos sean representativos de las condiciones actuales y futuras de las redes ópticas en escenarios prácticos.

6.4.1. Tipo de Tráfico

En esta tesis se trabajó con dos escenarios de tráfico: dinámico e incremental, con el objetivo de proporcionar una comparación realista y representativa de futuras tecnologías. El escenario dinámico, aunque no se utiliza ampliamente en las redes actuales, refleja una dirección clave en el desarrollo tecnológico futuro, mientras que el escenario incremental representa una variante más cercana a la realidad, caracterizada por un crecimiento gradual del tráfico [58]. El análisis de estos dos tipos de tráfico permite evaluar el rendimiento de las soluciones propuestas bajo distintas demandas y patrones de crecimiento en la red.

6.4.2. Selección de Bit Rates y Formatos de Modulación

Los bit rates seleccionados para las demandas de tráfico fueron 100 Gbps, 200 Gbps, 300 Gbps y 400 Gbps, siguiendo los estándares presentes en la literatura académica más reciente, como se observa en [33]. Para cada uno de estos bit rates, se consideraron diferentes FM, cuyo consumo espectral se detalla en la Tabla 6.4.

TABLA 6.4: Consumo espectral en función del Bit Rate para diferentes formatos de modulación [33].

FM	Consumo espectral [GHz]			
	100 Gb/s	200 Gb/s	300 Gb/s	400 Gb/s
DP-BPSK	50	100	150	200
DP-QPSK	25	50	75	100
DP-8QAM	16,7	33,4	50	66,7
DP-16QAM	12,5	25	37,5	50
DP-32QAM	10	20	30	40
DP-64QAM	8,33	16,6	25	33,4

Como se observa en la tabla, cada FM presenta un consumo espectral específico que varía según el bit rate utilizado. Los formatos más simples como DP-BPSK y DP-QPSK requieren un mayor ancho de banda, mientras que formatos más complejos como DP-32QAM y DP-64QAM logran una mayor eficiencia espectral. Sin embargo, esta eficiencia tiene un costo: a medida que aumenta la complejidad del FM, también se incrementa el QoT necesario para su operación, lo que puede resultar en una menor distancia máxima de transmisión.

6.4.3. Distancias de transmisión

Como se expuso en el Capítulo 4, las herramientas actuales de QoT-E presentan limitaciones significativas en escenarios MB. Para obtener resultados realistas se requiere conocimiento detallado de los dispositivos involucrados, incluyendo perfiles de dispersión, ruido y características específicas del fabricante, además de extensivas optimizaciones de parámetros mediante simulaciones iterativas. Incluso herramientas avanzadas como GNPY, a pesar de considerar efectos como el SRS, aún no modelan adecuadamente el comportamiento de amplificadores MB.

Debido a estas limitaciones, esta tesis emplea tablas de alcance, las cuales han sido elaboradas en diversos estudios de la literatura académica. Estas tablas proporcionan la distancia máxima de transmisión alcanzable para cada FM en diferentes escenarios y bandas teniendo en cuenta el peor caso de GSNR.

La Tabla 6.5 presenta el número máximo de spans de 100 km que puede transmitir cada FM en las distintas bandas, basado en los estudios realizados en [54], [103]. Estos valores fueron determinados para tres escenarios específicos: C+L, C+L+S y C+L+S+E.

TABLA 6.5: Distancia máxima por banda para diferentes formatos de modulación (en spans $\times 100$ km) [103].

FM	Escenario							
	C	L	C	L	S	C	L	E
DP-BPSK	197	167	174	167	148	130	144	31
DP-QPSK	99	84	87	84	74	65	72	15
DP-8QAM	54	46	47	46	41	35	39	9
DP-16QAM	14	22	23	22	20	17	19	4
DP-32QAM	13	11	12	11	10	8	9	2
DP-64QAM	7	6	6	6	5	4	5	1

A la fecha de este trabajo, no existen tablas de alcance calculadas específicamente para el escenario C+L+E. Por esta razón, los alcances para este escenario se obtuvieron de un escenario C+L+S+E, que posee un rango espectral más amplio. Como consecuencia, las distancias de cada banda se vieron más afectadas por el efecto SRS, produciendo una penalización considerable en el rendimiento. Si bien estos valores no son exactos, proporcionan una aproximación razonable de las capacidades reales de la banda E y pueden considerarse como el peor caso, asumiendo que cualquier resultado obtenido en las simulaciones será igual o superior en términos de rendimiento.

A partir de la información presentada hasta ahora, se tienen los datos suficientes para establecer una conexión individual. Para ilustrar su aplicación, se puede analizar el caso de una demanda de 400 Gb/s entre dos nodos separados por 2200 km en el escenario C+L con slots de 12,5 GHz. De acuerdo con las Tablas 6.4 y 6.5, existen dos alternativas viables: utilizar DP-16QAM en la banda L o DP-8QAM en la banda C, siendo estos los FM de mayor eficiencia espectral que satisfacen los requerimientos de distancia. Si se considera un escenario hipotético donde la banda L entre los nodos mencionados se encuentra totalmente ocupada, la única opción factible sería la transmisión a través de la banda C mediante DP-8QAM. Este FM

requiere un ancho de banda de 66,7 GHz, lo que equivale a 6 slots de 12,5 GHz ($12,5 \text{ GHz} \times 6 = 75 \text{ GHz}$). Por consiguiente, se deben utilizar 6 slots continuos y contiguos para establecer el lightpath correspondiente.

6.4.4. Definición de cargas de tráfico

En el contexto de tráfico dinámico, la relación entre la frecuencia de llegada de las conexiones y su tiempo de permanencia en la red influye de manera significativa en el rendimiento general. Una mayor frecuencia de llegada, en combinación con tiempos de estadía prolongados, puede saturar los recursos disponibles y afectar la eficiencia de la red. En este análisis, el tiempo entre llegadas sucesivas se modela mediante una distribución exponencial, donde la tasa promedio de llegada de conexiones está representada por el parámetro λ . De igual manera, el tiempo de permanencia de cada conexión en la red sigue una distribución exponencial, cuyo valor esperado se define como $1/\mu$.

A partir de estos valores, la carga de tráfico de la red, también conocida como Erlang (ρ), se define mediante la Ecuación 6.1. Este parámetro representa una medida estadística del volumen de tráfico en un sistema de telecomunicaciones y permite estimar la ocupación promedio de los recursos [104].

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (6.1)$$

Dado que cada red posee capacidades diferentes en función de su estructura, los valores de carga de tráfico simulados pueden variar según la topología utilizada. La Tabla 6.6 presenta los rangos de valores de Erlang empleados para cada topología.

TABLA 6.6: Cargas de tráfico simuladas para cada topología.

Topología	Rango de Erlangs (ρ)	Intervalo de Incremento
NSFNet	[1000, 4000]	250
UKNet	[2500, 8000]	500
EuroCore	[2500, 8000]	500

Es importante señalar que este parámetro es relevante únicamente en el contexto de tráfico dinámico; en el caso del tráfico incremental, las conexiones permanecen en la red de forma indefinida, con un tiempo de estadía teóricamente infinito. Por lo tanto, la capacidad de la red para gestionar una cantidad específica de conexiones no se ve afectada por su frecuencia de llegada.

6.5. Algoritmos de Asignación de Recursos

Los tipos de tráfico seleccionados requieren que la optimización de la red se realice en tiempo real. Por esta razón, se opta por utilizar dos heurísticas de tipo *greedy*, *first-fit* y *best-fit*, ambas ampliamente utilizadas en la literatura [69].

El propósito de estas heurísticas es resolver los problemas RMLBWA y RMLBSA, mencionados previamente en el Capítulo 3. La lógica de la asignación de recursos de forma general está ilustrada en la Figura 6.5 mediante un diagrama de flujo. Al

inicio, ante una solicitud de conexión, se selecciona una ruta de un conjunto previamente calculado, ordenado de menor a mayor longitud. A continuación, se elige el FM con la mayor eficiencia espectral (DP-64QAM) y, posteriormente, se selecciona la banda de transmisión. Para maximizar el uso de los recursos, es posible seguir una estrategia específica en la selección de bandas. Por ejemplo, en el escenario C+L, se podría comenzar asignando recursos en la banda L, seguido por la banda C. Esta priorización se detalla en secciones posteriores.

Si la distancia de transmisión del FM actual es suficiente para el largo de la ruta actual, se ejecuta la asignación del espectro (por ejemplo, mediante *first-fit*). En caso contrario, si el alcance no es suficiente o si no se cumplen las restricciones de continuidad y contigüidad, se selecciona otra banda de transmisión. Si la distancia de transmisión no es suficiente en ninguna de las bandas, se elige un FM de menor nivel (por ejemplo, DP-32QAM). Si no es posible utilizar ningún FM porque no hay distancia suficiente o si no hay capacidad espectral en la ruta actual que cumpla con las restricciones, entonces se selecciona otra ruta. Finalmente, si no existen más rutas disponibles, la conexión es bloqueada.

El pseudocódigo del mismo proceso se muestra en el Algoritmo 1, donde se presenta el paso a paso de manera más detallada. El algoritmo comienza con los argumentos de entrada: *origen*, *destino*, *bitrate* y *algoritmo*. Los términos *origen* y *destino* denotan los nodos fuente y destino de la solicitud de conexión, respectivamente; *bitrate* indica el bit rate requerido; y *algoritmo* especifica la estrategia de búsqueda a utilizar, ya sea *first-fit* o *best-fit*. Se emplean las variables $\vec{R}$ para representar el conjunto de rutas entre origen y destino, donde r denota la ruta actual; $\vec{M}$ para el conjunto de FM disponibles, siendo m el FM actual; y $\vec{B}$ para el conjunto de bandas disponibles en el escenario elegido, donde b representa la banda actual. Las rutas se encuentran preordenadas según su longitud, de menor a mayor.

Durante la ejecución, ante una solicitud de conexión (líneas de código 2-4) se itera sobre $\vec{R}$, $\vec{M}$ y $\vec{B}$ respectivamente. Si el alcance de m en b cumple con el largo total de r , se invoca al algoritmo de asignación entregando como parámetro r, m, b y *bitrate* en búsqueda de espacio libre que cumpla con las restricciones de continuidad y contigüidad. Si el algoritmo, tiene ÉXITO, se retorna ASIGNADA. En caso contrario, se retorna BLOQUEADA.

El número de rutas calculadas se establece en $K = 5$, donde K representa la cantidad de rutas más cortas a considerar en el algoritmo. Esto implica que, aunque entre dos nodos puedan existir más de cinco rutas, solo se tomarán en cuenta hasta la quinta. Esta limitación contribuye a reducir el tiempo de cómputo requerido para la búsqueda de recursos. Además, las rutas alternativas suelen implicar trayectos más largos y múltiples enlaces, lo cual, aunque podría permitir la asignación de la conexión actual, resultaría en un costo elevado en recursos, afectando negativamente las futuras conexiones.

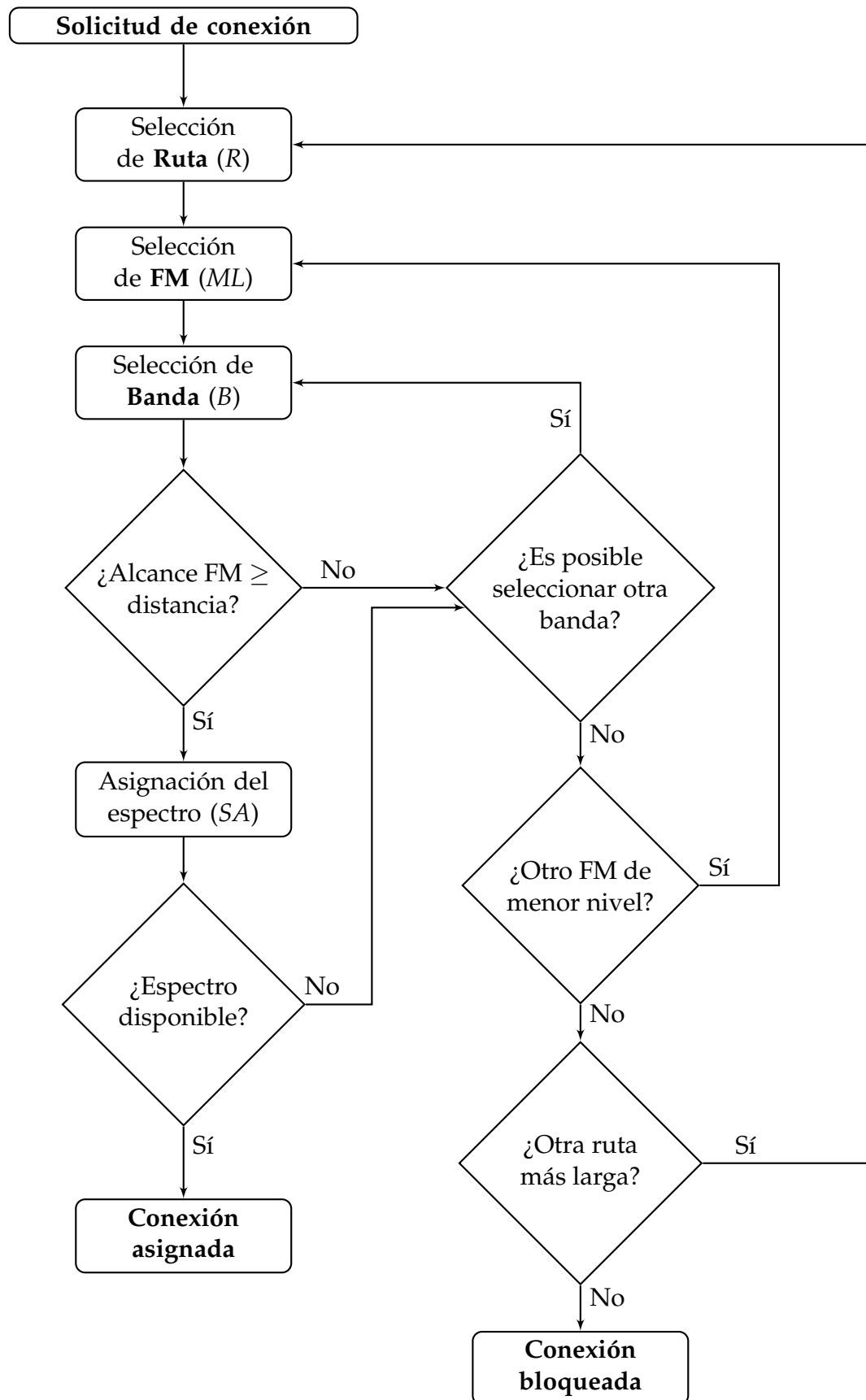


FIGURA 6.5: Diagrama de flujo del proceso de asignación de recursos.

Algoritmo 1: Pseudocódigo del proceso RMLBSA.

```

1 Función RMLBSA(origen, destino, bitrate, algoritmo):
2   para cada  $r \in \vec{R}_{origen \rightarrow destino}$  hacer
3     para cada  $m \in \vec{M}$  hacer
4       para cada  $b \in \vec{B}$  hacer
5         si  $ALCANCE(m, b) \geq LARGO(r)$  entonces
6           si algoritmo = first-fit entonces
7             resultado  $\leftarrow$  First-Fit(r, m, b, bitrate);
8           fin
9           si no, si algoritmo = best-fit entonces
10            resultado  $\leftarrow$  Best-Fit(r, m, b, bitrate);
11          fin
12          si resultado = ÉXITO entonces
13            devolver ASIGNADA;
14          fin
15        fin
16      fin
17    fin
18  fin
19  devolver BLOQUEADA;

```

6.5.1. First-Fit

El algoritmo First-Fit implementa una estrategia sencilla pero efectiva para la asignación del espectro, cuyo funcionamiento se basa en encontrar el primer espacio disponible que satisfaga los requerimientos de la demanda. Su pseudocódigo se muestra en el Algoritmo 2. Este recibe cuatro parámetros esenciales: la ruta designada (*r*), el FM (*m*), la banda (*b*) y el bit rate requerido (*bitrate*). El proceso inicia en la línea 2 con la creación de un vector $\vec{S}$ que actúa como representación unificada del estado de todos los canales a lo largo de la ruta. Esta representación se construye iterando sobre cada enlace y sus respectivos canales (líneas 3-9), donde dada la restricción de continuidad: si un canal está ocupado en cualquier punto de la ruta, se considera inhabilitado para toda la conexión, lo que permite comprimir el estado de todos los canales de la ruta en un solo vector.

Una vez construido el vector $\vec{S}$, el algoritmo procede a buscar un conjunto contiguo de canales que satisfaga las necesidades de la demanda actual (líneas 10-25). Durante esta búsqueda, se mantienen tres variables de control: *Requerido* indica la cantidad necesaria de canales para satisfacer el *bitrate* bajo el *m* actual, *Total* lleva la cuenta de los canales consecutivos disponibles encontrados, e *Índice* marca la posición inicial donde se comenzaría la asignación.

El proceso de búsqueda itera sobre el vector $\vec{S}$. Cuando encuentra un canal *Libre*, incrementa el contador *Total*. Si este contador alcanza el valor *Requerido*, significa que se ha encontrado un bloque válido de canales contiguos, procediendo entonces a su asignación y retornando ÉXITO. Por el contrario, si durante la búsqueda se encuentra un canal *Ocupado*, el contador *Total* se reinicia y el índice se actualiza, continuando la búsqueda desde la siguiente posición. Si la búsqueda concluye sin encontrar un bloque adecuado de canales, el algoritmo retorna RECHAZO, indicando la imposibilidad de satisfacer la demanda con los recursos disponibles.

Algoritmo 2: Pseudocódigo del proceso First-Fit.

```

1 Función First-Fit( $r, m, b, \text{bitrate}$ ):
2    $\vec{S} \leftarrow \text{TAMAÑO}(C_{0,b}) \times \text{Libre};$ 
3   para cada  $l \in \vec{L}_r$  hacer
4     para cada  $c \in \vec{C}_{l,b}$  hacer
5       si  $c = \text{Ocupado}$  entonces
6          $\vec{S}[\text{INDICE}(c, \vec{C})] \leftarrow \text{Ocupado};$ 
7       fin
8     fin
9   fin
10   $\text{Requerido} \leftarrow \text{REQUERIDO}(m, \text{bitrate});$ 
11   $\text{Total} \leftarrow 0;$ 
12   $\text{Indice} \leftarrow 0;$ 
13  para cada  $c \in \vec{S}$  hacer
14    si  $c = \text{Libre}$  entonces
15       $\text{Total} \leftarrow \text{Total} + 1;$ 
16      si  $\text{Total} = \text{Requerido}$  entonces
17         $\text{ASIGNAR}(\text{Indice}, \text{Requerido}, b);$ 
18        devolver ÉXITO;
19      fin
20    fin
21    en otro caso
22       $\text{Indice} \leftarrow \text{Indice} + \text{Total};$ 
23       $\text{Total} \leftarrow 0;$ 
24    fin
25  fin
26  devolver ÉXITO;

```

6.5.2. Best-Fit

El algoritmo Best-Fit representa una evolución sobre la estrategia First-Fit, implementando un enfoque más exhaustivo en la asignación de recursos. A diferencia de su contraparte que selecciona el primer espacio disponible, Best-Fit examina todos los bloques candidatos para identificar el que mejor se ajuste al espacio requerido, manteniendo las restricciones de continuidad y contigüidad. Como se detalla en el Algoritmo 3, este comparte los mismos parámetros de entrada que First-Fit: la ruta designada (r), el FM (m), la banda (b) y el bit rate requerido (bitrate).

El proceso inicia de manera idéntica a First-Fit, construyendo el vector $\vec{S}$ que representa el estado unificado de los canales a lo largo de la ruta (líneas 2-9). La diferencia fundamental radica en el proceso de búsqueda y selección del bloque de canales (líneas 10-30). Best-Fit utiliza dos variables adicionales: *MejorTotal* y *MejorIndice*, que almacenan el tamaño del bloque más ajustado y su posición inicial, respectivamente.

Durante la iteración sobre $\vec{S}$, el algoritmo examina todos los bloques disponibles para identificar el que minimice el espacio residual. Al encontrar un canal *Ocupado*, si el bloque actual es válido (mayor o igual que *Requerido*) y menor que el mejor encontrado, se actualizan las variables de control. Finalizada la búsqueda, se verifica si el último bloque es válido (líneas 27-30). El algoritmo retorna ÉXITO si se encontró al

menos un bloque válido ($MejorIndice \neq -1$) y procede a la asignación, caso contrario retorna *RECHAZO*.

Algoritmo 3: Pseudocódigo del proceso Best-Fit.

```

1 Función Best-Fit( $r, m, b, bitrate$ ):
2    $\vec{S} \leftarrow \text{TAMAÑO}(C_{0,b}) \times \text{Libre};$ 
3   para cada  $l \in \vec{L}_r$  hacer
4     para cada  $c \in \vec{C}_{l,b}$  hacer
5       si  $c = \text{Ocupado}$  entonces
6          $\vec{S}[\text{INDICE}(c, \vec{C})] \leftarrow \text{Ocupado};$ 
7       fin
8     fin
9   fin
10   $\text{Requerido} \leftarrow \text{REQUERIDO}(m, bitrate);$ 
11   $\text{MejorTotal} \leftarrow \infty;$ 
12   $\text{MejorIndice} \leftarrow -1;$ 
13   $\text{Total} \leftarrow 0;$ 
14   $\text{Indice} \leftarrow 0;$ 
15  para cada  $c \in \vec{S}$  hacer
16    si  $c = \text{Libre}$  entonces
17       $\text{Total} \leftarrow \text{Total} + 1;$ 
18    fin
19    en otro caso
20      si  $\text{Total} \geq \text{Requerido}$  y  $\text{Total} < \text{MejorTotal}$  entonces
21         $\text{MejorTotal} \leftarrow \text{Total};$ 
22         $\text{MejorIndice} \leftarrow \text{Indice};$ 
23      fin
24       $\text{Indice} \leftarrow \text{Indice} + \text{Total};$ 
25       $\text{Total} \leftarrow 0;$ 
26    fin
27    si  $\text{Total} \geq \text{Requerido}$  y  $\text{Total} < \text{MejorTotal}$  entonces
28       $\text{MejorTotal} \leftarrow \text{Total};$ 
29       $\text{MejorIndice} \leftarrow \text{Indice};$ 
30    fin
31  fin
32  si  $\text{MejorIndice} \neq -1$  entonces
33     $\text{ASIGNAR}(\text{MejorIndice}, \text{Requerido}, b);$ 
34    devolver ÉXITO;
35  fin
36  devolver RECHAZO;

```

6.5.3. Orden de las Bandas

El orden de priorización de las bandas durante el proceso de asignación puede impactar significativamente en el rendimiento del sistema. Estudios previos [31] han demostrado que, en escenarios C+L, resulta beneficioso priorizar la asignación en la banda L sobre la banda C durante el aprovisionamiento de recursos.

Esta estrategia se fundamenta en las diferencias de rendimiento óptico entre bandas. La banda C, al presentar mejores características de transmisión, permite utilizar FM de orden superior en rutas donde la banda L se limitaría a FM de menor nivel. La priorización inicial de la banda C podría resultar en un agotamiento prematuro de sus recursos con conexiones que pudieron ser asignadas en la banda L. Esto forzaría a que transmisiones de larga distancia, que requieren específicamente las características de la banda C, tengan que ser asignadas en la banda L con FM de baja eficiencia o, en el peor de los casos, ser bloqueadas [31].

Esta estrategia se extiende naturalmente a escenarios C+L+E y C+L+S. En estos casos, priorizar las bandas S y E abre la posibilidad de mantener FM de orden superior incluso en bandas con peor rendimiento óptico. Por otro lado, para rutas más largas, donde el rendimiento óptico se vuelve crítico, es probable que al no poder asignar en bandas alternativas se utilicen bandas como L y C, que ofrecen mejores características de transmisión.

En consecuencia, el orden de priorización de bandas durante el proceso de asignación de recursos varía según el escenario, como se ilustra en la Tabla 6.7. En el escenario C+L, la priorización sigue el orden L y C. Para el escenario C+L+S, el orden es S, L y C. Finalmente, en el escenario C+L+E, se sigue el orden E, C y L. En este último caso, se prioriza C sobre L debido a que el efecto del SRS impacta de manera más significativa a la banda C, causando que tenga incluso menor alcance que la banda L, como se verificó en los valores presentados previamente en la Tabla 6.5.

TABLA 6.7: Orden de priorización de bandas por escenario

Escenario	Orden de priorización
C+L	$L \rightarrow C$
C+L+S	$S \rightarrow L \rightarrow C$
C+L+E	$E \rightarrow C \rightarrow L$

6.6. Métricas

Para la evaluación de los escenarios propuestos, se consideraron tres métricas principales. Las dos primeras, previamente definidas en el Capítulo 2, corresponden a la probabilidad de bloqueo (BP) y la capacidad de la red, esta última presentada tanto en términos de conexiones establecidas como en throughput total. Considerando la heterogeneidad en los perfiles de tráfico utilizados, se incorporó además la probabilidad de bloqueo de ancho de banda (BBP). A continuación, se definen en detalle tanto el BBP como el cálculo del throughput para la evaluación de capacidad.

6.6.1. Probabilidad de Bloqueo de Ancho de Banda

La evolución de las redes ópticas ha dado lugar a escenarios de tráfico heterogéneo, donde las conexiones demandan distintos anchos de banda en función del bit rate y FM empleado [60]. En este contexto, la probabilidad de bloqueo de ancho de banda (*Bandwidth Blocking Probability*, BBP) surge como una métrica más representativa que el BP convencional [105].

El BBP incorpora en su cálculo tanto el número de conexiones bloqueadas como el ancho de banda específico solicitado por cada una de ellas, proporcionando así una

evaluación más precisa del rendimiento de la red. A diferencia del BP tradicional, que considera todas las conexiones de manera equivalente, el BBP introduce un factor de ponderación basado en los recursos demandados, resultando en una medida más equitativa del rendimiento del sistema [60].

El cálculo del BBP se expresa mediante la ecuación 6.2, donde B representa el conjunto de bit rates disponibles en la red, h_b denota el peso asociado a cada bit rate b , y BP_b corresponde al BP específico de las conexiones de bit rate b .

$$BBP = \frac{\sum_{b \in B} h_b \cdot BP_b}{\sum_{b \in B} h_b} \quad (6.2)$$

El peso h_b se define como el promedio del ancho de banda requerido (en THz) por el bit rate b considerando todos sus posibles FM. Los valores de estos pesos varían según el escenario, dado que los requerimientos espectrales difieren en cada caso.

Para ejemplificar el cálculo de los pesos, se analiza el caso del peso h_{100} en el escenario C+L con slots de 6,25 GHz. De acuerdo con los valores presentados previamente en la Tabla 6.4, los requerimientos de ancho de banda para cada FM indican que: DP-64QAM requiere 8.33 GHz ($2 \times 6,25$ GHz), DP-32QAM y DP-16QAM necesitan 10 GHz y 12.5 GHz respectivamente ($2 \times 6,25$ GHz), DP-8QAM utiliza 16.7 GHz ($3 \times 6,25$ GHz), DP-QPSK demanda 25 GHz ($4 \times 6,25$ GHz), y DP-BPSK requiere 50 GHz ($8 \times 6,25$ GHz).

En la Ecuación 6.3 se presenta el cálculo del promedio de estos requerimientos espectrales, obteniéndose un peso h_b de aproximadamente 0.218 THz. Este proceso de cálculo se aplica de manera análoga para cada bit rate en los distintos escenarios considerados.

$$h_b = \frac{(2 + 2 + 2 + 3 + 4 + 8)}{6} \times 0,0625 \text{ THz} \approx 0,21875 \text{ THz} \quad (6.3)$$

Es importante señalar que, si bien el BBP pondera cada demanda según sus características específicas, el BP tradicional continúa siendo un indicador válido cuando todas las conexiones se consideran igualmente importantes. Por esta razón, en esta tesis se utilizan ambas métricas para evaluar el rendimiento del sistema.

6.6.2. Throughput de la Red

El *throughput* representa una de las perspectivas para evaluar la capacidad de la red, cuantificando la cantidad de datos que pueden ser transmitidos en un período determinado [60]. En el contexto de redes ópticas elásticas con tráfico heterogéneo, esta métrica resulta particularmente relevante ya que, de manera análoga al BBP, considera las características específicas de cada conexión en lugar de tratarlas como equivalentes.

El throughput total se calcula mediante la ecuación 6.4, donde C es el conjunto de conexiones establecidas en la red y B_c corresponde al bit rate la conexión c .

$$T = \sum_{c \in C} B_c \quad (6.4)$$

6.7. Software de Simulación

Para las simulaciones se utilizó *Flex Net Sim* [106], una biblioteca de simulación de código abierto desarrollada en C++ especializada en el análisis y desarrollo de algoritmos de asignación de recursos.

Esta herramienta destaca por su facilidad para implementar estos algoritmos, específicamente en el contexto de EONs con tráfico dinámico; sin embargo, su arquitectura flexible también permite adaptarse a escenarios fixed-grid y tráfico incremental. Además, actualizaciones recientes del software han incorporado soporte para escenarios MB, característica que la hace idónea para este caso de estudio.

6.7.1. Configuración de la demanda de tráfico

Las características de las demandas de tráfico en *Flex Net Sim* se definen mediante un archivo JSON que especifica, para cada bit rate, la cantidad de canales que se requiere por cada FM. Hasta la fecha de este estudio, la biblioteca no contempla efectos físicos durante la transmisión; en su lugar, utiliza como parámetro de entrada el alcance de cada FM según la banda de transmisión. Enfoque ideal para los parámetros previamente descritos en 6.4.3.

En el Anexo A se presenta, a modo de ejemplo, la estructura de las demandas de tráfico para el escenario C+L+E considerando canales de 50 GHz.

6.7.2. Configuración de las topologías de red

Para definir la estructura de la red y sus rutas correspondientes, la biblioteca utiliza dos archivos JSON. El primero contiene las características de los enlaces, incluyendo la capacidad por banda (número de canales), la distancia de cada enlace y los nodos de origen y destino. La capacidad de cada enlace se representa mediante un valor abstracto en GHz, lo que implica que el usuario debe asegurar que esta información sea coherente con los datos especificados en los archivos de demanda de tráfico. Por ejemplo, si un enlace tiene 100 slots de 12,5 GHz, se debe considerar que la granularidad de los slots requeridos para los bit rates también esté en unidades de 12,5 GHz.

El segundo archivo define las rutas, las cuales deben ser precalculadas por el usuario. Para este proceso, se utilizó el algoritmo de Dijkstra en cada una de las topologías seleccionadas, con un valor de $K = 5$, y se formatearon los resultados en un archivo JSON compatible con la biblioteca. Durante la simulación, estas rutas se recorren en el orden en que aparecen en el archivo JSON, por lo que es importante organizarlas de menor a mayor distancia.

La biblioteca no contempla dispositivos de red como ROADMs o transpondedores, ya que su enfoque principal es la gestión de recursos en la red, asumiendo que el hardware necesario para operar está disponible.

A modo de ejemplo, el archivo JSON de la topología NSFNet para el escenario C+L con canales de 12,5 GHz se presenta en el Anexo B. Debido a su extensión, el archivo de rutas no se incluye, pero se pueden encontrar ejemplos en el repositorio de la biblioteca¹.

¹<https://gitlab.com/DaniloBorquez/flex-net-sim>

6.7.3. Programación de los algoritmos de asignación y métricas

La biblioteca proporciona un marco de trabajo altamente flexible que facilita la implementación de algoritmos de asignación de recursos sin restricciones estructurales predefinidas. Esta característica permite desarrollar tanto algoritmos tradicionales (first-fit y best-fit) como propuestas algorítmicas personalizadas. La misma flexibilidad se extiende a las métricas de rendimiento, donde además de la métrica estándar BP, es posible implementar métricas personalizadas como BBP y el análisis de capacidad.

El código del algoritmo first-fit utilizando Flex Net Sim se encuentra disponible en el Anexo C.

6.7.4. Variables aleatorias

La generación aleatoria de solicitudes de conexión en Flex Net Sim sigue una distribución exponencial para las tasas de llegada y salida, tal como se detalló en 6.4.4. Para cada una de estas solicitudes, se selecciona aleatoriamente, mediante una distribución uniforme, el nodo origen, el nodo destino y el bit rate requerido [106]. Además, la biblioteca permite definir semillas específicas para cada uno de estos procesos de generación aleatoria.

6.7.5. Ejecución de la biblioteca

Durante la ejecución de una simulación, Flex Net Sim proporciona información detallada del progreso a través de la consola, presentando tanto los parámetros de configuración como las métricas de rendimiento en tiempo real. La Figura 6.1 ilustra una salida típica de consola utilizando el algoritmo first-fit en la red NSFNet.

En esta se visualizan los parámetros fundamentales de la simulación: una red compuesta por 14 nodos (Nodes) y 44 enlaces (Links), configurada para procesar 10^6 conexiones (Goal Connections), con tasas de llegada $\lambda = 1000$ y permanencia $\mu = 1$. Es importante notar que el número de enlaces mostrado (44) difiere del número de enlaces físicos de la red (22, como se presentó en la Sección 6.2). Esto se debe a que la biblioteca trabaja con enlaces unidireccionales, representando cada enlace físico como dos enlaces independientes, uno para cada dirección de transmisión.

El sistema implementa un monitoreo continuo del progreso, registrando el número total de conexiones procesadas (arrives) y actualizando el cálculo de BP (blocking) en cada etapa. Para asegurar la robustez estadística de los resultados, se incorporan tres metodologías distintas para el cálculo de intervalos de confianza: Wald, Agresti-Coull y Wilson, cada una aportando una estimación del rango en el que se encuentra el verdadero valor de la métrica.

En el ejemplo mostrado, la evolución temporal revela cómo el BP converge a un valor estable de aproximadamente $4,1 \times 10^{-3}$ después de procesar un millón de conexiones, con intervalos de confianza del orden de $1,3 \times 10^{-4}$. Esta convergencia, junto con la precisión de los intervalos, evidencia una alta fiabilidad en los resultados obtenidos.

El proceso finaliza al alcanzar el número objetivo de conexiones establecido inicialmente. En este caso, la simulación concluye tras procesar exitosamente 10^6 solicitudes, momento en el cual se consolida el valor final de BP.

FIGURA 6.1: Salida por consola de una simulación usando Flex Net Sim.

1	Nodes:	14					
2	Links:	44					
3	Goal Connections:	1e6					
4	Lambda:	1000					
5	Mu:	1					
6	Algorithm:	FirstFit					
7							
8	+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+						
9	progress	arrives	blocking	time(s)	Wald CI	A-C. CI	Wilson CI
10	+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+						
11	5.0%	50000	2.7e-03	10	4.6e-04	4.6e-04	4.6e-04
12	10.0%	100000	3.4e-03	21	3.6e-04	3.6e-04	3.6e-04
13	15.0%	150000	3.7e-03	32	3.1e-04	3.1e-04	3.1e-04
14	20.0%	200000	3.7e-03	42	2.6e-04	2.7e-04	2.6e-04
15	25.0%	250000	3.5e-03	53	2.3e-04	2.3e-04	2.3e-04
16	30.0%	300000	3.5e-03	63	2.1e-04	2.1e-04	2.1e-04
17	35.0%	350000	3.6e-03	74	2.0e-04	2.0e-04	2.0e-04
18	40.0%	400000	3.8e-03	84	1.9e-04	1.9e-04	1.9e-04
19	45.0%	450000	3.8e-03	95	1.8e-04	1.8e-04	1.8e-04
20	50.0%	500000	3.9e-03	106	1.7e-04	1.7e-04	1.7e-04
21	55.0%	550000	3.8e-03	116	1.6e-04	1.6e-04	1.6e-04
22	60.0%	600000	4.1e-03	127	1.6e-04	1.6e-04	1.6e-04
23	65.0%	650000	4.1e-03	137	1.6e-04	1.6e-04	1.6e-04
24	70.0%	700000	4.3e-03	148	1.5e-04	1.5e-04	1.5e-04
25	75.0%	750000	4.2e-03	158	1.5e-04	1.5e-04	1.5e-04
26	80.0%	800000	4.2e-03	169	1.4e-04	1.4e-04	1.4e-04
27	85.0%	850000	4.2e-03	180	1.4e-04	1.4e-04	1.4e-04
28	90.0%	900000	4.2e-03	190	1.3e-04	1.3e-04	1.3e-04
29	95.0%	950000	4.1e-03	201	1.3e-04	1.3e-04	1.3e-04
30	100.0%	1000000	4.1e-03	211	1.3e-04	1.3e-04	1.3e-04

6.7.6. Hardware de simulación

Las simulaciones se llevaron a cabo en una estación de trabajo equipada con un procesador Intel(R) Core(TM) i5-9400F @ 2.90 GHz y 32 GB de memoria RAM DDR4 instalada en configuración dual-channel (dos módulos de 16 GB). Esta configuración proporcionó los recursos computacionales necesarios para ejecutar las múltiples iteraciones de simulación de manera eficiente.

6.8. Parámetros generales

El número de solicitudes simuladas para cada escenario se definió según el tipo de tráfico utilizado. Para el tráfico dinámico, se estableció un volumen de 10^6 conexiones por simulación. Este valor garantiza tanto la convergencia estadística del BP, como la obtención de intervalos de confianza lo suficientemente acotados.

En el caso del tráfico incremental, donde la métrica principal es la capacidad de la red, las simulaciones se realizaron con un objetivo de 10^4 solicitudes. No obstante, debido a la naturaleza acumulativa de este tipo de tráfico, el umbral establecido siempre fue alcanzado antes de completar dicha cantidad de solicitudes. Comportamiento que era esperado y necesario para el cálculo de esta métrica.

6.9. Análisis estadístico

El tratamiento estadístico de los resultados se realizó de manera diferenciada según la métrica, empleando en todos los casos un nivel de significancia $\alpha = 0,05$. Para

maximizar la validez estadística, cada simulación utilizó semillas aleatorias basadas en valores del sistema como la hora local, aprovechando la capacidad de la biblioteca para definir semillas en la generación de variables aleatorias.

Para el análisis de BP, se utilizaron directamente los intervalos de confianza al 95 % proporcionados por el simulador, seleccionando el valor más conservador entre los tres métodos implementados. En el caso de BBP, se realizaron cuatro simulaciones por escenario, calculando los intervalos de confianza a partir de la desviación estándar, el error estándar y la distribución t con tres grados de libertad.

Para las mediciones de capacidad en tráfico incremental se implementó un protocolo más exhaustivo, considerando que cada simulación procesa un menor número de solicitudes. El diseño experimental incluyó 30 iteraciones independientes por escenario, permitiendo obtener intervalos de confianza utilizando 29 grados de libertad en la distribución t .

6.10. Resumen de los escenarios

En base a los distintos parámetros presentados en este capítulo, la Tabla 6.8 detalla a modo de resumen cada uno de los escenarios simulados para cada topología, detallando el tipo de tráfico, algoritmo, bandas, tamaño del canal, cantidad de conexiones y número de iteraciones. Adicionalmente, se incluyó el escenario C+L con fixed-grid (50 GHz) que actúa como *baseline* para compararlo con los enfoques propuestos. En total, se simularon 20 escenarios por topología (NSFNet, UKNet y EuroCore), resultando en un total de 60 escenarios únicos (20×3).

TABLA 6.8: Escenarios de simulación por topología

Nº	Tráfico	Algoritmo	Bandas	Conexiones	Canal (GHz)	Iteraciones
1	Incremental	First-Fit	C+L	10^4	6,25	30
2	Incremental	First-Fit	C+L	10^4	12,5	30
3	Incremental	First-Fit	C+L	10^4	50	30
4	Incremental	First-Fit	C+L+S	10^4	50	30
5	Incremental	First-Fit	C+L+E	10^4	50	30
6	Incremental	Best-Fit	C+L	10^4	6,25	30
7	Incremental	Best-Fit	C+L	10^4	12,5	30
8	Incremental	Best-Fit	C+L	10^4	50	30
9	Incremental	Best-Fit	C+L+S	10^4	50	30
10	Incremental	Best-Fit	C+L+E	10^4	50	30
11	Dinámico	First-Fit	C+L	10^6	6,25	4
12	Dinámico	First-Fit	C+L	10^6	12,5	4
13	Dinámico	First-Fit	C+L	10^6	50	4
14	Dinámico	First-Fit	C+L+S	10^6	50	4
15	Dinámico	First-Fit	C+L+E	10^6	50	4
16	Dinámico	Best-Fit	C+L	10^6	6,25	4
17	Dinámico	Best-Fit	C+L	10^6	12,5	4
18	Dinámico	Best-Fit	C+L	10^6	50	4
19	Dinámico	Best-Fit	C+L+S	10^6	50	4
20	Dinámico	Best-Fit	C+L+E	10^6	50	4

Capítulo 7

Resultados y análisis

En este capítulo se presentan y analizan los resultados numéricos de las simulaciones considerando las métricas probabilidad de bloqueo (BP), probabilidad de bloqueo de ancho de banda (BBP) y capacidad de la red. A través de estos indicadores, se busca comparar el rendimiento de las diferentes configuraciones propuestas.

7.1. Probabilidad de Bloqueo

En esta sección se abordan los resultados de BP bajo diferentes cargas de tráfico. Menor valor de BP indica un mejor rendimiento del sistema. Para efectos prácticos, se han considerado marginales aquellos valores inferiores a 10^{-4} , aproximándolos a cero. Cada resultado incluye sus respectivos intervalos de confianza, obtenidos según la metodología descrita previamente.

Escenarios EON C+L

La Figura 7.1 muestra tres gráficos de BP empleando la configuración de bandas C+L. Cada gráfico corresponde a una topología diferente y presenta los resultados obtenidos con canales de 6,25 GHz y 12,5 GHz, utilizando los algoritmos first-fit (FF) y best-fit (BF).

En el contexto de la topología NSFNet (7.1a), los resultados numéricos no evidencian diferencias sustanciales entre las configuraciones. Las curvas de tendencia muestran una notable proximidad entre sí, aunque se observa un ligero predominio de BF - 6,25 GHz en condiciones de baja carga de tráfico. La divergencia más significativa se manifiesta a los 1250 Erlang, donde el mejor BP alcanza 0,0028 % en contraste con el peor BP de 0,0041 %. Esta diferencia se traduce en aproximadamente 1300 conexiones, considerando 10^6 solicitudes, esta variación podría considerarse marginal en términos prácticos.

Para la topología UKNet (7.1b), las diferencias entre configuraciones se tornan más evidentes. En este contexto, BF con canales de 6,25 GHz exhibe el rendimiento más destacado, seguido por FF con la misma granularidad. Es notable observar que ambos escenarios convergen en cargas de tráfico intermedias. Los escenarios C+L con canales de 12,5 GHz evidencian un peor rendimiento en todo el rango de cargas de tráfico en comparación con sus contrapartes de 6,25 GHz.

La topología EuroCore (7.1c) presenta patrones similares a los observados en UKNet. La jerarquía de rendimiento se mantiene, con BF de 6,25 GHz liderando los resultados. Sin embargo, resulta significativo notar una separación más pronunciada entre los escenarios que emplean canales de 12,5 GHz y aquellos que utilizan 6,25

GHz. De manera análoga a UKNet, las variantes de cada configuración de espacio de canal tienden a converger bajo altas cargas de tráfico.

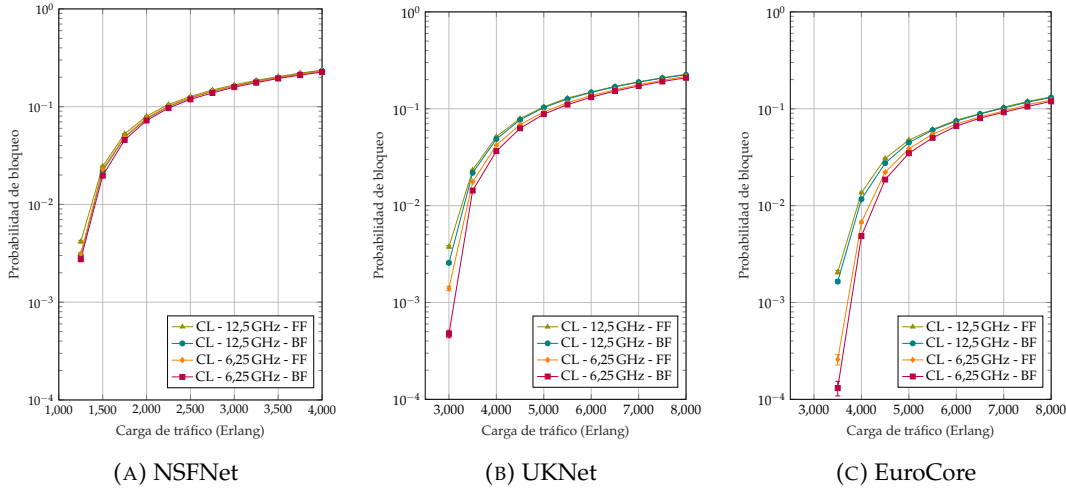


FIGURA 7.1: Probabilidad de bloqueo por topología con bandas C+L.

En términos generales, los escenarios con bandas C+L revelan que la implementación de canales más granulares produce un rendimiento superior, particularmente en condiciones de baja carga de tráfico. No obstante, conforme la carga aumenta, la separación entre las curvas de tendencia disminuye, presentando diferencias marginales en cargas medias-altas. Las topologías que exhiben mayor beneficio de la granularidad son UKNet y EuroCore, un fenómeno que puede atribuirse a que estas redes presentan enlaces más cortos, lo cual posibilita la utilización de FM de alto nivel, permitiendo así establecer conexiones con mayor eficiencia espectral. Esta característica, junto con la granularidad permite maximizar la eficiencia.

En lo que respecta al algoritmo de asignación, BF demuestra consistentemente un rendimiento superior a FF. Esto puede atribuirse a la capacidad de BF para seleccionar los bloques que mejor se ajustan a cada demanda específica, lo cual potencialmente resulta en una reducción de los bloqueos por fragmentación. De todas maneras, a partir de medianas cargas de tráfico, prácticamente no hay variación.

Escenarios MB C+L+S/E.

La Figura 7.2 expone los resultados correspondientes a la configuración C+L+S/E para cada topología. Los gráficos presentan cuatro curvas de tendencia: en rojo y verde se visualizan los escenarios C+L+E con BF y FF respectivamente, mientras que en naranja y azul se representan los escenarios C+L+S con sus respectivas variantes algorítmicas.

La primera observación que destaca es que, para todas las topologías, las curvas de tendencia de BF y FF muestran una superposición casi perfecta dentro de cada configuración de banda. Las pequeñas variaciones observadas en condiciones de baja carga de tráfico pueden atribuirse a la naturaleza estocástica propia de las simulaciones, sumado a una posible ventaja que puede obtener BF sobre FF, pero de todas maneras, prácticamente imperceptible.

En la topología NSFNet (7.2a), se evidencia una diferencia significativa entre los escenarios C+L+E y C+L+S, donde este último exhibe un rendimiento notablemente superior, comenzando a manifestar bloqueos únicamente a partir de los 2000 Erlang.

Si bien la separación entre ambas configuraciones se mantiene a lo largo del espectro de cargas de tráfico, su prominencia disminuye gradualmente, aunque sin llegar a un punto de convergencia.

Con UKNet (7.2b) el rendimiento de los escenarios se invierte. En este caso, C+L+E demuestra resultados superiores. De igual manera que en el caso anterior, diferentes algoritmos para un mismo escenario exhiben rendimientos virtualmente idénticos. La ventaja de C+L+E se sostiene consistentemente en todos los puntos de Erlang, aunque la magnitud de esta diferencia resulta menos pronunciada que en el caso de NSFNet.

Para la topología EuroCore (7.2c) el patrón observado es similar. C+L+E muestra un claro rendimiento superior a lo largo de todas las cargas de tráfico. Es relevante notar que, en términos generales, esta topología exhibe valores absolutos de BP menores para ambos escenarios de bandas en relación con las topologías anteriores.

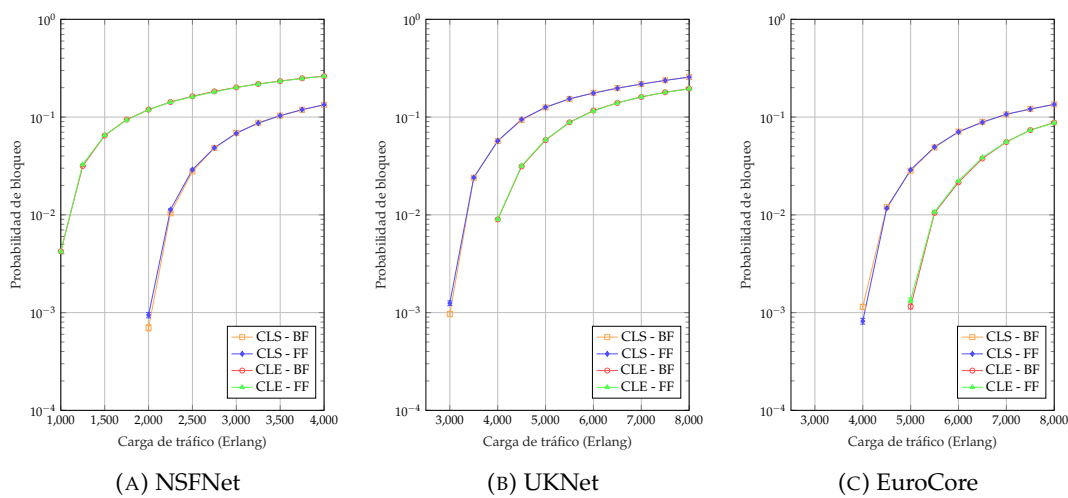


FIGURA 7.2: Probabilidad de bloqueo por topología con bandas C+L+S/E.

Los hallazgos en estos escenarios revelan que la efectividad de la configuración MB extendida está intrínsecamente ligada a las características topológicas de la red. En redes de larga distancia, como NSFNet, la configuración C+L+S demuestra resultados superiores. Esta observación podría parecer contraintuitiva inicialmente, considerando que el escenario C+L+E aporta un ancho de banda total superior (24,5 THz) en comparación con C+L+S (19,8 THz). Sin embargo, estas diferencias pueden explicarse por los alcances significativamente menores de la banda E en comparación a la banda S, lo cual resulta en una subutilización del ancho de banda adicional, especialmente en topologías de larga distancia. En contraste, la banda S contribuye con un ancho de banda considerable manteniendo alcances de transmisión comparables a la banda L en formatos de modulación de alto nivel (por ejemplo, con DP-16QAM se logra una transmisión efectiva de hasta 2000 km, en comparación con los 2200 km de la banda L). Para el mismo FM, la distancia de transmisión en la banda E se limita a apenas 400 km.

Siguiendo este razonamiento, resulta coherente que en escenarios de corta distancia, como UKNet y EuroCore, la configuración C+L+E muestre un rendimiento superior. En estos casos, los alcances de transmisión parecieran ser suficientes para que el ancho de banda adicional ofrecido por la banda E pueda ser utilizado de manera efectiva.

Análisis Comparativo de Probabilidad de Bloqueo

La Figura 7.3 presenta una comparación de los escenarios que exhibieron el mejor rendimiento para cada configuración. Para el caso C+L, se seleccionó la implementación BF con espaciado de 6,25 GHz, a pesar de que las diferencias en rendimiento no fueron sustanciales. En cuanto a C+L+S y C+L+E, se optó por los algoritmos FF, debido a que, a pesar de mostrar un rendimiento equivalente al de BF, presenta una menor carga computacional, lo que lo hace más eficiente en términos de procesamiento. Adicionalmente, se incorpora la curva base o *baseline*, que representa el escenario C+L con fixed-grid (50 GHz), recordando que este constituye el punto de referencia más próximo en la evolución de las redes troncales. La inclusión de este escenario resulta fundamental para evaluar comparativamente los potenciales beneficios de las configuraciones propuestas.

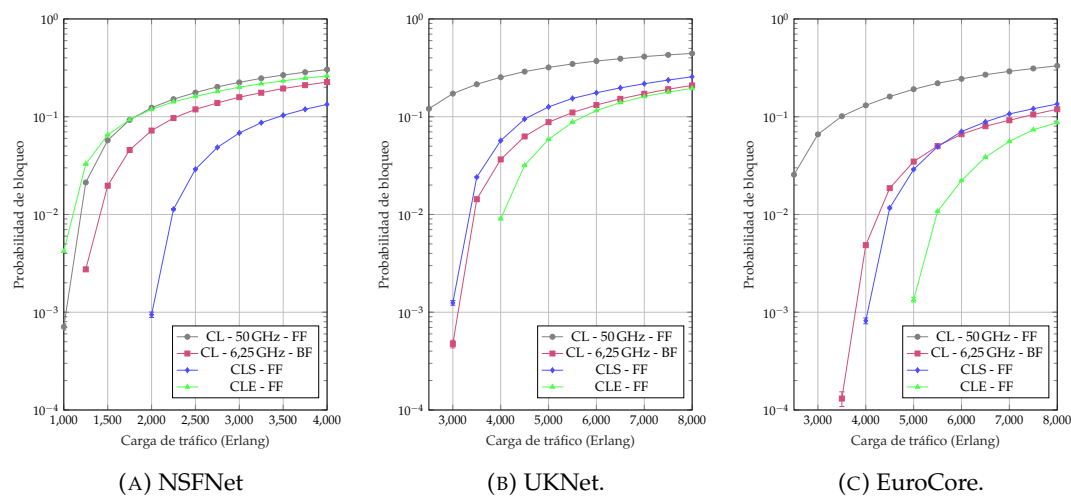


FIGURA 7.3: Mejores valores de BP por topología.

En la topología NSFNet, se observa que C+L+E con FF en condiciones de baja carga de tráfico exhibe un rendimiento incluso inferior al *baseline*. Este fenómeno puede atribuirse a que la incorporación de una nueva banda (en este caso, la banda E) impacta negativamente en el QoT de las bandas preexistentes (C y L), reduciendo consecuentemente el alcance efectivo. En principio, este impacto negativo debería verse compensado por la capacidad adicional que aporta la banda E; sin embargo, debido a su inherente limitación de alcance y a las extensas distancias características de NSFNet, esta nueva capacidad resulta inutilizable. Al aproximarse a cargas de tráfico cercanas a los 2000 Erlang C+L+E logra superar marginalmente el escenario base. En cuanto al escenario flex-grid en C+L, este ocupa una posición intermedia en términos de rendimiento, superando a C+L+E en todos los puntos, aunque esta diferencia disminuye a altas cargas de tráfico. C+L+S demuestra consistentemente los mejores resultados de BP en esta topología, beneficiándose de su combinación de alta capacidad y largo alcance.

En el contexto de UKNet, conforme a lo analizado previamente en el caso MB extendido, C+L+E y C+L+S invierten sus posiciones relativas de rendimiento, evidenciándose las ventajas de la implementación de la banda E. El escenario C+L mantiene una posición intermedia, aunque converge con C+L+E en altas cargas de tráfico, sugiriendo que ambas soluciones resultan igualmente efectivas en estas condiciones. La línea base en este escenario se distancia significativamente de las tres propuestas,

lo cual subraya un incremento sustancial en el rendimiento, independientemente de la configuración seleccionada.

Finalmente, para el escenario EuroCore el orden de los resultados cambia. En este caso, para cargas de tráfico bajas a medias, el escenario C+L 6,26 GHz muestra ser el con peor rendimiento en comparación con MB extendido, manteniéndose relativamente próximo a C+L+S. Sin embargo, en condiciones de alta carga de tráfico, este orden se invierte, y C+L logra superar el rendimiento de la configuración con banda S. Esta variación, puede atribuirse a que EuroCore presenta enlaces de longitud intermedia (con un promedio de 875 km frente a los 463 km de UKNet). Esta característica tiene múltiples implicaciones: primero, los enlaces mantienen una longitud suficientemente reducida para que C+L+E mantenga su efectividad, por lo mismo presenta los niveles mas bajos de BP. No obstante, este incremento en las distancias impacta en C+L, requiriendo la utilización de FM de menor nivel, lo cual reduce la relevancia de la granularidad y favorece la capacidad por sobre la eficiencia espectral.

7.2. Probabilidad de Bloqueo de Ancho de Banda

La métrica BBP introduce una dimensión adicional al análisis de rendimiento en comparación con BP al ponderar el ancho de banda requerido por cada solicitud de conexión bloqueada. Esta consideración incorpora un elemento de equidad en la evaluación, pues el bloqueo de conexiones que demandan mayor capacidad de transmisión impacta más significativamente en el resultado final. En esta sección se presentan los valores BBP para cada escenario simulado. Para facilitar la comparación con los resultados anteriores, cada escenario mantiene los mismos colores que en los gráficos de BP. Además, al igual que en el análisis anterior, los valores inferiores a 10^{-4} se aproximaron a cero.

Escenarios EON C+L.

La Figura 7.4 ilustra los valores BBP correspondientes a los escenarios C+L para cada topología analizada.

En el caso de la topología NSFNet (Subfigura 7.4a), los resultados entre las diferentes configuraciones C+L no evidencian diferencias sustanciales. No obstante, resulta particularmente interesante observar que, a pesar de la aparente homogeneidad en los resultados, las configuraciones que exhiben mejor rendimiento difieren de las observadas en BP. En este caso, los canales de 12,5 GHz demuestran una ligera superioridad.

La topología UKNet presenta un comportamiento distintivo, donde los canales de 6,25 GHz recuperan su posición de predominio en condiciones de baja carga de tráfico, particularmente cuando se implementan mediante el algoritmo BF. Sin embargo, esta ventaja se disminuye progresivamente al superar los 4500 Erlang, punto a partir del cual las diferencias entre configuraciones se tornan marginales. En el caso de EuroCore, si bien el orden relativo de rendimiento mantiene similitudes con UKNet, el punto de convergencia entre las diferentes configuraciones se desplaza y ocurre en cargas de tráfico más elevadas. Esta característica puede atribuirse probablemente a la mayor capacidad inherente de esta red.

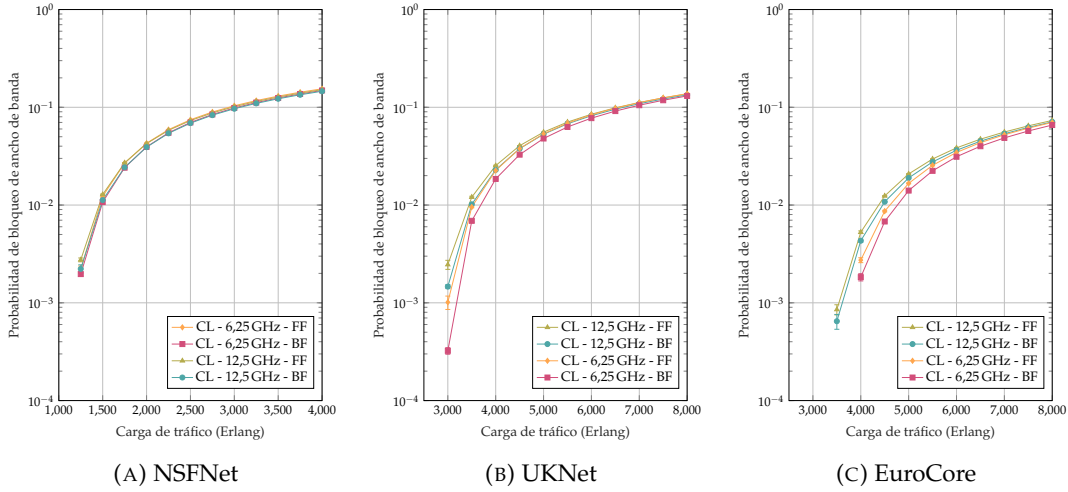


FIGURA 7.4: Probabilidad de bloqueo de ancho de banda por topología con bandas C+L.

Escenarios MB C+L+S/E.

En la Figura 7.5 se muestran los resultados para C+L+S/E para cada topología. En términos generales, la jerarquía de rendimiento observada en BP se mantiene consistente para BBP. NSFNet (7.5a) continúa favoreciendo la configuración C+L+S. Por su parte, en UKNet y EuroCore (7.5b) C+L+E sostiene el mejor rendimiento. Además, nuevamente no se presentan diferencias significativas entre los algoritmos FF y BF, incluso en condiciones de baja carga de tráfico.

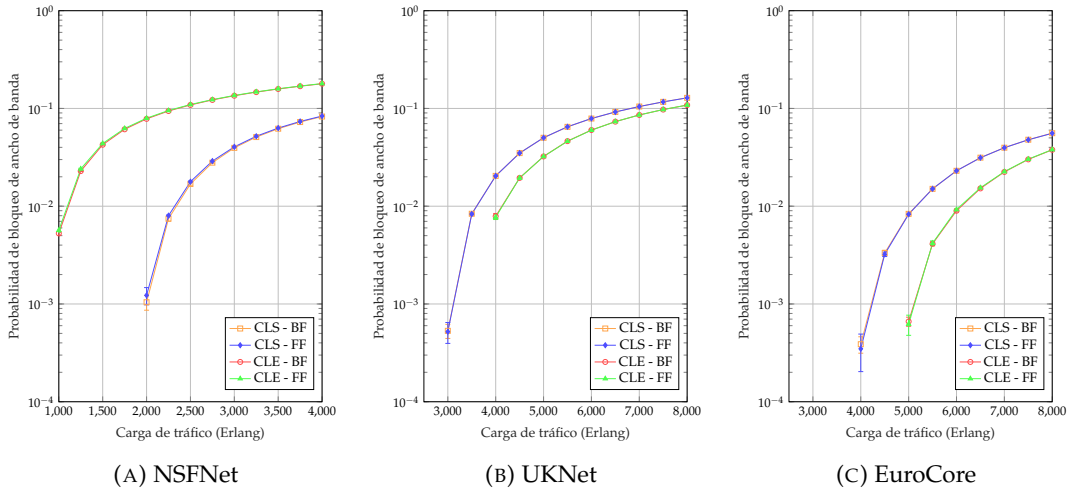


FIGURA 7.5: Probabilidad de bloqueo de ancho de banda por topología con bandas C+L+S/E.

Comparación general de BBP.

Los gráficos presentados en la Figura 7.6 integran los escenarios que exhibieron el mejor rendimiento en términos de BBP para cada topología. Siguiendo la metodología establecida en el análisis de BP, se incorpora el baseline C+L fixed-grid como punto de referencia.

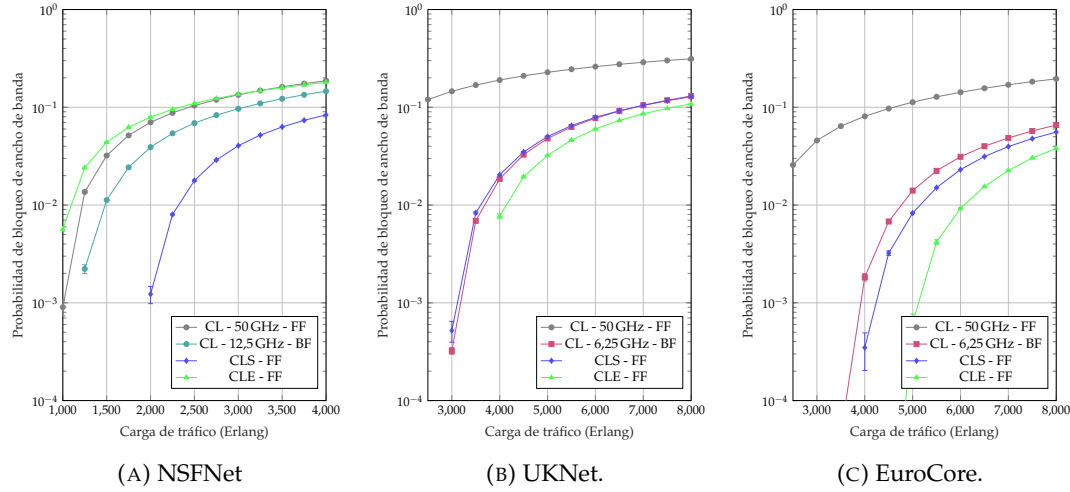


FIGURA 7.6: Mejores valores de BBP por topología.

En el caso de NSFNet, el baseline y C+L+E vuelven a presentar rendimientos similares en condiciones de baja carga, sin embargo, a diferencia del análisis de BP, C+L+E nunca logra superar al baseline. Estos resultados sugieren que C+L+E no aporta mejoras sustanciales al rendimiento de esta topología en condiciones de tráfico dinámico. La configuración C+L+S mantiene su posición de liderazgo en términos de BBP. Para el escenario C+L, esta vez se consideró el escenario con canales de 12,5 GHz con BF, mostrando una cercanía a los resultados de C+L+E, similar a las mediciones de BP.

En UKNet, se observa que C+L+S y C+L 6,25 GHz presentan resultados bastante similares, aunque C+L muestra ser ligeramente superior. Por su parte C+L+E muestra superioridad para todo el rango de cargas de tráfico. Similar que en BP, el baseline tiene un rendimiento alejado del resto de las configuraciones.

Para EuroCore, los resultados son similares a los obtenidos en BP. C+L+E vuelve a liderar los resultados; sin embargo, el cruce entre C+L y C+L+S ya no ocurre, con la banda S manteniendo su superioridad a lo largo de todas las cargas de tráfico.

En términos generales, el análisis de BBP pareciera desfavorecer el posicionamiento de C+L respecto a las demás configuraciones. Esto se debe a que C+L con flex-grid obtiene buenos valores de BP al explotar la asignación de conexiones con requerimientos de ancho de banda reducido. Sin embargo, en métricas donde estas conexiones de bajo ancho de banda tienen menor relevancia, el beneficio de C+L se reduce significativamente.

7.3. Análisis de capacidad

Las probabilidades de bloqueo de una red dinámica, ya sea BP o BBP, no constituyen necesariamente un indicador definitivo y transferible a otros contextos con distinto tipo de tráfico, como estático o incremental. Por esta razón, un análisis de la capacidad de la red en tráfico incremental proporciona una mirada más completa de los escenarios propuestos, independiente de la carga de tráfico que pueda sufrir la red en determinado momento. Esta sección presenta dicho análisis desde dos perspectivas complementarias: la cantidad de conexiones que la red puede establecer y el bit

rate total que puede transportar. Ambas métricas se evalúan considerando un umbral de BP del 10 %, donde la capacidad efectiva de la red queda determinada por el estado de la red al momento de alcanzar dicho umbral.

7.3.1. Conexiones establecidas

En la Figura 7.7 se muestran tres gráficos de capacidad, donde cada gráfico representa una topología específica. Los valores de capacidad se expresan en términos de la cantidad de conexiones establecidas, representándose mediante barras azules los resultados obtenidos con first-fit y barras rojas para best-fit. Cada medición incluye su respectivo intervalo de confianza. La homogeneidad en la escala del eje Y para las tres topologías permite evidenciar las diferencias intrínsecas de capacidad entre ellas.

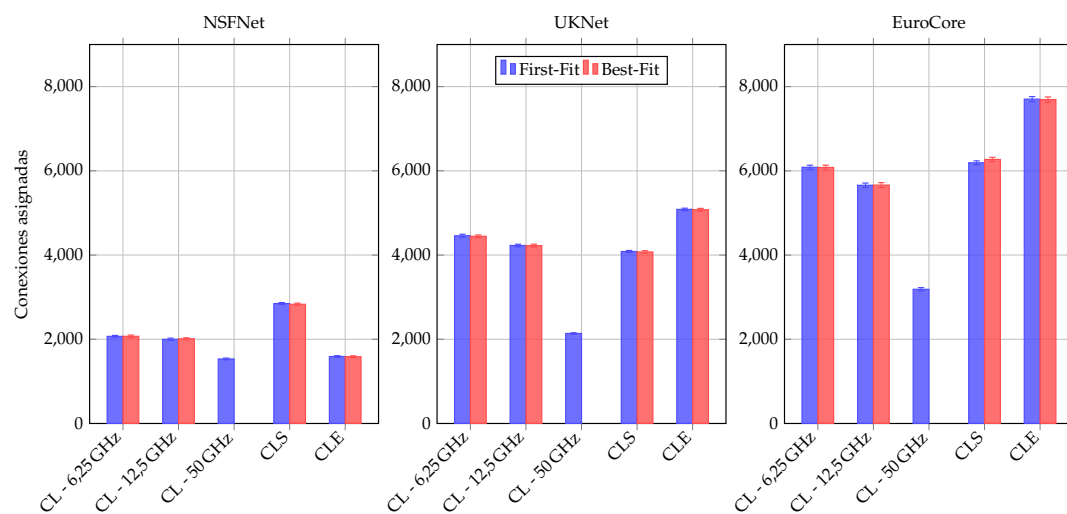


FIGURA 7.7: Cantidad de conexiones asignadas por escenario en diferentes topologías antes de alcanzar un umbral de BP de 10 %.

La topología NSFNet, representada en la primera columna, exhibe resultados consistentes con los análisis previos de BP y BBP, confirmando a C+L+S con FF como la configuración de mayor rendimiento. En términos cuantitativos, este escenario logra un incremento aproximado del 86 % de capacidad efectiva respecto al escenario base. Le sigue la configuración C+L con canales de 6,25 GHz, que alcanza un aumento del 35 % de capacidad. El escenario C+L+E, por su parte, presenta un crecimiento de apenas el 4 %. Este último resultado respalda observaciones previas, vistas en BP donde C+L+E mostraba resultados similares, o incluso peores al baseline, probablemente debido a que en redes de larga distancia el espacio extra que aporta la banda E es prácticamente inutilizable. Por otra parte, resulta relevante observar que, para todas las configuraciones, las variaciones entre algoritmos FF y BF se mantienen dentro de los márgenes de los intervalos de confianza (del orden del 0,1 %), imposibilitando determinar diferencias significativas entre algoritmos.

En UKnet los beneficios de las configuraciones propuestas se amplifican significativamente, alcanzando valores en el rango de 4000-5000 conexiones, en marcado contraste con el escenario base que apenas supera las 2000 conexiones. Esta observación sugiere que cualquiera de los escenarios propuestos representa una mejora sustancial en términos de capacidad efectiva. La configuración C+L+E emerge como la opción que maximiza la capacidad, logrando un incremento aproximado del 137 %

respecto al escenario base. La configuración C+L con canales de 6,25 GHz se posiciona en segundo lugar con un aumento del 109 %, seguida por C+L+S que alcanza un incremento del 91 %. De igual manera que en NSFNet, no hay variaciones significativas entre algoritmos.

La topología EuroCore mantiene la tendencia observada en UKNet, con C+L+E liderando el rendimiento y proporcionando un incremento aproximado del 142 % respecto al escenario base. Entre las configuraciones C+L, el escenario con canales de 6,25 GHz demuestra nuevamente su superioridad, alcanzando un aumento aproximado del 91 % de capacidad. En C+L+S, el porcentaje de incremento respecto al baseline alcanza el 96 %, evidenciando un rendimiento cercano entre ambas configuraciones.

En lo que respecta a los escenarios EON, las configuraciones con espaciado de 6,25 GHz demostraron un mayor rendimiento de manera consistente a lo largo de todas las topologías analizadas, presentando una mejora promedio del 5,3 % respecto a las configuraciones con 12,5 GHz. Esta diferencia alcanza su máximo valor en la topología EuroCore, donde los canales más granulares proporcionan un incremento del 7,4 % de capacidad respecto a 12,5 GHz.

Los resultados del análisis de capacidad muestran una notable consistencia con los patrones observados en las métricas BP y BBP. En el caso de NSFNet, el análisis de capacidad respalda el bajo aporte de capacidad de la banda E. En UKNet, se confirma la superioridad de C+L sobre C+L+S, y finalmente, los resultados obtenidos en EuroCore confirman la equivalencia práctica entre las configuraciones C+L y C+L+S, corroborando las observaciones previas donde sus curvas de rendimiento se entrecruzaban en los análisis de BP.

7.3.2. Conexiones establecidas por banda

La Figura 7.8 presenta un análisis detallado de la contribución de cada banda a la capacidad de la red. Este análisis complementa los resultados previamente discutidos, permitiendo comprender la utilización específica de cada banda en los diferentes escenarios. Los resultados mostrados corresponden exclusivamente al algoritmo FF, dado que no se observaron diferencias relevantes entre algoritmos.

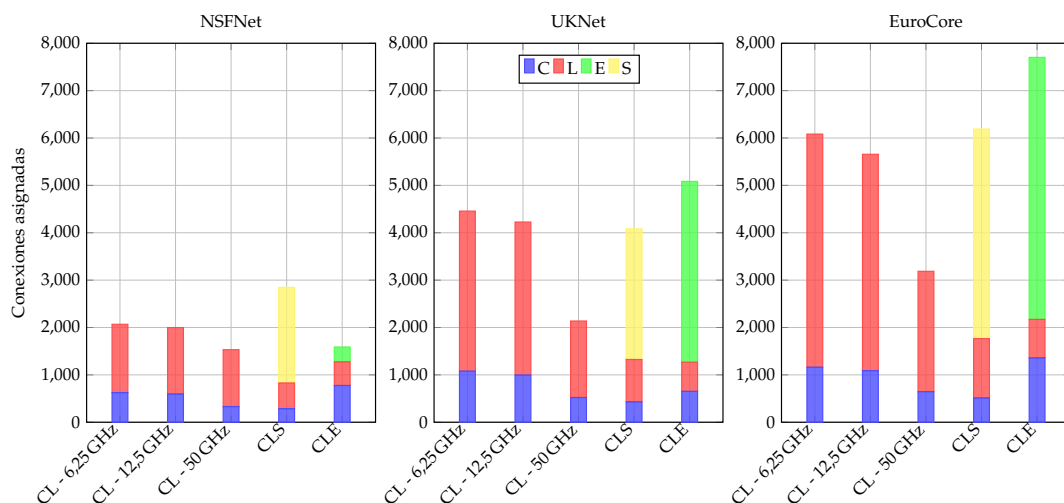


FIGURA 7.8: Cantidad de conexiones asignadas por banda utilizando FF por topología antes de alcanzar un umbral de BP de 10 %.

En NSFNet, los escenarios con configuraciones C+L muestran una distribución donde la mayoría de las conexiones se asignan en la banda L, lo cual tiene sentido considerando la prioridad escogida ($L \rightarrow C$), y que es una banda con mayor capacidad y similar alcance a la banda C. En el caso de C+L+S, que alcanza el mayor rendimiento total, se puede observar claramente el aporte significativo de la banda S. En este caso, la distribución resulta en 10 % en banda C, 20 % en banda L y 70 % en banda S. Los resultados del escenario C+L+E terminan por confirmar las observaciones previamente realizadas, donde la banda E con suerte contribuye con ancho de banda utilizable, resultando en apenas un 19 % de las conexiones asignadas en esta banda, incluso considerando que es la primera prioridad ($E \rightarrow C \rightarrow L$).

En UKNet, los escenarios MB revelan su aporte donde ambas bandas por separado superan la capacidad de las bandas C+L juntas. Es relevante destacar que las capacidades de las bandas C y L para los escenarios C+L+S y C+L+E son prácticamente las mismas y su diferenciación ocurre solo por la banda adicional. Para los escenarios flex-grid, la eficiencia lograda con 6,25 GHz logra, al menos, triplicar la cantidad de conexiones asignadas en la banda L respecto a los escenarios MB.

En EuroCore, los resultados son bastante similares a UKNet, pero en mayores magnitudes. La banda E logra posicionar a C+L+E con el mejor rendimiento. En este caso, su capacidad parece incluso permitir que en C+L se puedan asignar más conexiones comparado con el escenario C+L+S, a diferencia de la topología anterior.

7.3.3. Throughput de la red

La Figura 7.9 presenta el throughput total alcanzado por cada configuración en las distintas topologías antes de alcanzar el umbral de BP del 10 %. De manera análoga al análisis de conexiones establecidas, se representan mediante barras azules los resultados obtenidos con first-fit y barras rojas para best-fit, incluyendo sus respectivos intervalos de confianza. Los resultados se expresan en Gb/s.

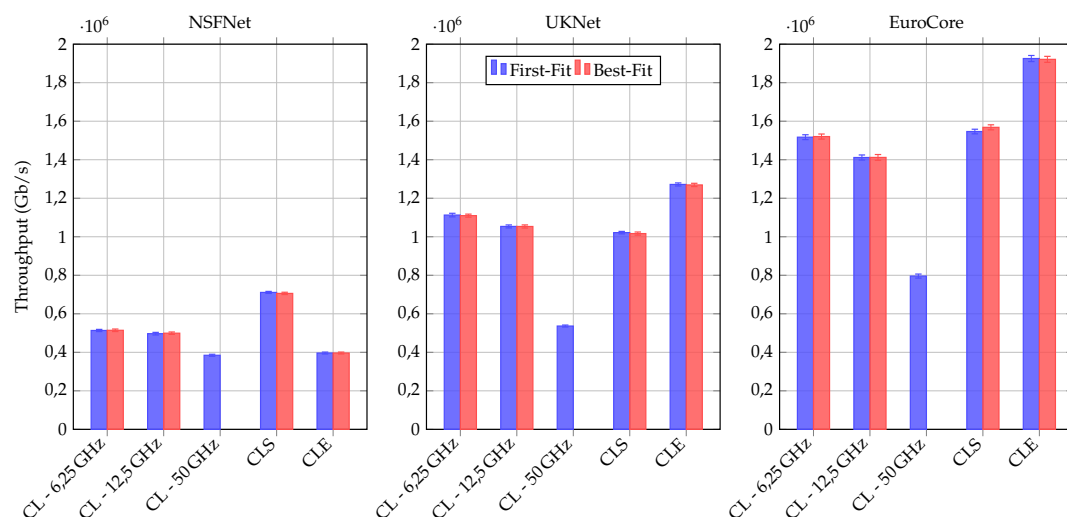


FIGURA 7.9: Throughput por escenario en diferentes topologías antes de alcanzar un umbral de BP de 10 %.

Los resultados mantienen una notable consistencia con los patrones observados en el análisis de conexiones establecidas, presentando variaciones marginales del orden del 1-2 % respecto a los resultados anteriores. NSFNet confirma el predominio

de C+L+S y el limitado aporte de C+L+E; UKNet mantiene a C+L+E como la configuración más efectiva, seguida por C+L 6,25 GHz y C+L+S en ese orden; y EuroCore sostiene el liderazgo de C+L+E, con C+L y C+L+S mostrando rendimientos prácticamente equivalentes. La superioridad de los canales de 6,25 GHz en configuraciones EON también se mantiene consistente a lo largo de todas las topologías.

Esta marcada similitud entre los patrones de rendimiento en ambas métricas de capacidad sugiere que las diferentes configuraciones mantienen una distribución relativamente homogénea de bit rates en sus conexiones establecidas, lo cual sugiere que ninguna estrategia, incluyendo las EONs, presenta sesgos hacia conexiones de ciertos bit rates específicos.

7.3.4. Throughput por banda

La Figura 7.10 desglosa la contribución de cada banda al throughput total de la red. Los resultados corresponden al algoritmo first-fit. En las barras apiladas se representa la banda C en azul, la banda L en rojo, la banda E en verde y la banda S en amarillo.

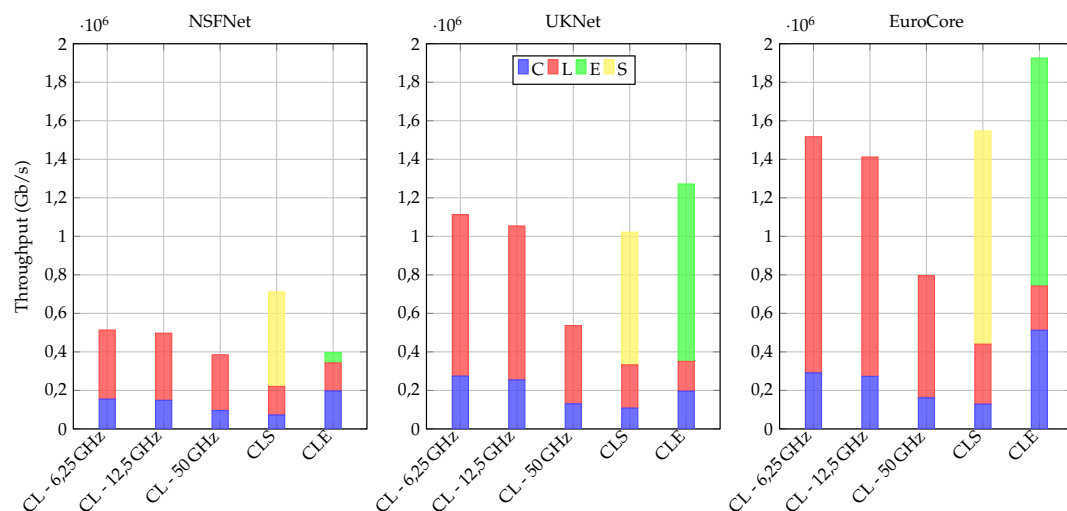


FIGURA 7.10: Throughput por banda utilizando FF por topología antes de alcanzar un umbral de BP de 10 %.

La distribución del throughput entre bandas refleja los mismos patrones identificados previamente en el análisis de capacidad por conexiones. Las pequeñas variaciones observadas entre ambas métricas son atribuibles a la natural ponderación que introduce el bit rate en cada conexión, sin que esto represente una diferencia significativa en términos prácticos. Esta consistencia se mantiene a lo largo de todas las topologías analizadas: NSFNet conserva el predominio de la banda L en configuraciones C+L y el significativo aporte de la banda S en C+L+S; UKNet confirma la superioridad individual de las bandas adicionales (E y S) sobre la capacidad combinada de C+L; y EuroCore mantiene los patrones de distribución previamente observados, con C+L+E liderando el rendimiento. Esta notable similitud entre las distribuciones de throughput y conexiones por banda refuerza las conclusiones obtenidas en el análisis previo de capacidad.

Capítulo 8

Conclusiones

En esta tesis se realizó un análisis comparativo entre redes ópticas MB en configuración extendida C+L+S/E y redes MB-EON en configuración C+L. El estudio se enfocó en evaluar el rendimiento de ambos enfoques en términos de probabilidad de bloqueo y capacidad de red. Los resultados fueron obtenidos mediante simulaciones que consideraron diversas topologías, escenarios de tráfico y algoritmos de asignación, permitiendo extraer una serie de conclusiones relevantes.

En primer lugar, los resultados confirmaron que la configuración MB extendida permite un rendimiento superior en todos los escenarios de manera consistente, validando así la hipótesis inicial del estudio. Sin embargo, se observó que la elección óptima de la banda a expandir varía en función de las características de la topología. En topologías de larga distancia como NSFNet, la configuración C+L+S demostró ser la más efectiva; mientras que en topologías de distancias más cortas como UK-Net y EuroCore, la configuración C+L+E alcanzó los mejores resultados. Esto sugiere que la decisión de expandir a una banda u otra debe considerar cuidadosamente las características específicas de la red.

Adicionalmente, el análisis de métricas que consideran la heterogeneidad del tráfico, como la probabilidad de bloqueo de ancho de banda (BBP) y el throughput total, proporcionó resultados equivalentes a los basados únicamente en cantidad de conexiones. Esta consistencia demuestra que ninguna de las soluciones evaluadas presenta sesgos hacia cierto tipo de demandas de tráfico, respaldando así la robustez de los resultados obtenidos.

Es notable que, a pesar de la superioridad general de MB extendido, el uso de EONs demostró tener un rendimiento competitivo, incluso al compararlo con configuraciones que ofrecían casi el doble de ancho de banda, como C+L+S, o más del doble en el caso de C+L+E. Más aún, en condiciones de tráfico incremental, las EONs alcanzaron un incremento de capacidad de hasta 109 %, evidenciando que la eficiencia espectral de esta estrategia puede compensar significativamente la falta de capacidad adicional.

Esta investigación ha identificado, además, una limitación importante en la expansión continua de MB, particularmente en topologías de larga distancia como NSFNet. En estos escenarios, donde ciertas bandas no aportan ancho de banda extra utilizable, la expansión más allá de la banda S podría resultar contraproducente. Esta observación sugiere que, tras la expansión hacia la banda S, las alternativas más viables podrían orientarse hacia la implementación de EONs o la adopción de tecnologías alternativas como SDM.

A pesar de los sólidos resultados obtenidos, esta investigación presenta algunas limitaciones que deben considerarse. Por una parte, las tablas de alcance utilizadas para el escenario C+L+E presentan una penalización derivada del uso de la banda S, lo que resulta en una posible subestimación del rendimiento en este escenario. Incorporar los valores reales podría incrementar aún más la ventaja de este escenario en topologías de corta distancia. Adicionalmente, es relevante mencionar que el rendimiento de las EONs en este trabajo está intrínsecamente relacionado con el perfil de tráfico utilizado, y su generalización debe considerar que, en escenarios con conexiones de mayor capacidad (donde el requisito mínimo de ancho espectral pueda ser mayor, por ejemplo, 50 GHz), una mayor granularidad podría no contribuir significativamente al rendimiento de la red.

Como trabajo futuro, se propone comparar los escenarios considerando estrategias que incorporen el uso de QoT-E para estimar el GSNR de las bandas, así como estrategias para evitar la fragmentación en el caso de las EONs. Además, incorporar métricas que consideren los costos de implementación de cada escenario, como el costo por bit, ayudaría a evaluar cada opción para determinar la solución más rentable. Finalmente, sería relevante analizar cuál es el factor más determinante de una topología al momento de seleccionar la banda a expandir, ya sea S o E, si es solo el largo de las rutas o si afectan otras características, y en qué medida influyen. Estas direcciones de investigación futura prometen expandir el conocimiento en el campo y contribuir al desarrollo de redes ópticas preparadas para las crecientes demandas de tráfico.

Apéndice A

Archivo JSON de la demanda de tráfico

FIGURA A.1: Archivo de la demanda de tráfico en escenario C+L+E con canales de 50 GHz.

```

1 {
2   "100": {
3     "BPSK": {
4       "C": {"slots": 1, "reach": 17400},
5       "L": {"slots": 1, "reach": 16700},
6       "E": {"slots": 1, "reach": 4500}
7     }
8   },
9   "200": {
10    "QPSK": {
11      "C": {"slots": 1, "reach": 8700},
12      "L": {"slots": 1, "reach": 8400},
13      "E": {"slots": 1, "reach": 2200}
14    },
15    "BPSK": {
16      "C": {"slots": 2, "reach": 17400},
17      "L": {"slots": 2, "reach": 16700},
18      "E": {"slots": 2, "reach": 4500}
19    }
20  },
21  "300": {
22    "8QAM": {
23      "C": {"slots": 1, "reach": 4700},
24      "L": {"slots": 1, "reach": 4600},
25      "E": {"slots": 1, "reach": 1300}
26    },
27    "QPSK": {
28      "C": {"slots": 2, "reach": 8700},
29      "L": {"slots": 2, "reach": 8400},
30      "E": {"slots": 2, "reach": 2200}
31    },
32    "BPSK": {
33      "C": {"slots": 3, "reach": 17400},
34      "L": {"slots": 3, "reach": 16700},
35      "E": {"slots": 3, "reach": 4500}
36    }
37  },
38  "400": {
39    "16QAM": {
40      "C": {"slots": 1, "reach": 2300},
41      "L": {"slots": 1, "reach": 2200},
42      "E": {"slots": 1, "reach": 600}
43    },
44    "8QAM": {
45      "C": {"slots": 2, "reach": 4700},
46      "L": {"slots": 2, "reach": 4600},
47      "E": {"slots": 2, "reach": 1300}
48    },
49    "QPSK": {
50      "C": {"slots": 2, "reach": 8700},
51      "L": {"slots": 2, "reach": 8400},
52      "E": {"slots": 2, "reach": 2200}
53    },
54    "BPSK": {
55      "C": {"slots": 4, "reach": 17400},
56      "L": {"slots": 4, "reach": 16700},
57      "E": {"slots": 4, "reach": 4500}
58    }
59  }
60 }

```

Apéndice B

Archivo JSON de topología de red

FIGURA B.1: Archivo JSON de la topología NSFNet en el escenario C+L con canales 12,5 GHz.

```

1 {
2   "alias": "NSFNet",
3   "links": [
4     {"dst": 1, "id": 0, "length": 2100.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 0},
5     {"dst": 0, "id": 1, "length": 2100.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 1},
6     {"dst": 2, "id": 2, "length": 3000.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 0},
7     {"dst": 0, "id": 3, "length": 3000.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 2},
8     {"dst": 7, "id": 4, "length": 4800.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 0},
9     {"dst": 0, "id": 5, "length": 4800.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 7},
10    {"dst": 3, "id": 6, "length": 1500.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 1},
11    {"dst": 1, "id": 7, "length": 1500.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 3},
12    {"dst": 2, "id": 8, "length": 1200.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 1},
13    {"dst": 1, "id": 9, "length": 1200.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 2},
14    {"dst": 5, "id": 10, "length": 3600.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 2},
15    {"dst": 2, "id": 11, "length": 3600.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 5},
16    {"dst": 6, "id": 12, "length": 1500.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 7},
17    {"dst": 7, "id": 13, "length": 1500.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 6},
18    {"dst": 8, "id": 14, "length": 1500.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 7},
19    {"dst": 7, "id": 15, "length": 1500.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 8},
20    {"dst": 4, "id": 16, "length": 1200.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 3},
21    {"dst": 3, "id": 17, "length": 1200.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 4},
22    {"dst": 10, "id": 18, "length": 3900.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 3},
23    {"dst": 3, "id": 19, "length": 3900.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 10},
24    {"dst": 4, "id": 20, "length": 2400.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 5},
25    {"dst": 5, "id": 21, "length": 2400.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 4},
26    {"dst": 13, "id": 22, "length": 3600.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 5},
27    {"dst": 5, "id": 23, "length": 3600.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 13},
28    {"dst": 9, "id": 24, "length": 2100.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 5},
29    {"dst": 5, "id": 25, "length": 2100.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 9},
30    {"dst": 6, "id": 26, "length": 1200.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 4},
31    {"dst": 4, "id": 27, "length": 1200.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 6},
32    {"dst": 11, "id": 28, "length": 1200.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 10},
33    {"dst": 10, "id": 29, "length": 1200.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 11},
34    {"dst": 12, "id": 30, "length": 1500.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 10},
35    {"dst": 10, "id": 31, "length": 1500.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 12},
36    {"dst": 9, "id": 32, "length": 2700.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 6},
37    {"dst": 6, "id": 33, "length": 2700.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 9},
38    {"dst": 11, "id": 34, "length": 600.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 13},
39    {"dst": 13, "id": 35, "length": 600.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 11},
40    {"dst": 12, "id": 36, "length": 300.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 13},
41    {"dst": 13, "id": 37, "length": 300.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 12},
42    {"dst": 8, "id": 38, "length": 1500.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 9},
43    {"dst": 9, "id": 39, "length": 1500.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 8},
44    {"dst": 11, "id": 40, "length": 600.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 8},
45    {"dst": 8, "id": 41, "length": 600.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 11},
46    {"dst": 12, "id": 42, "length": 600.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 8},
47    {"dst": 8, "id": 43, "length": 600.0, "slots": {"C": 344, "L": 480}, "src": 12}
48  ],
49   "name": "NSFNet",
50   "nodes": [
51     {"id": 0}, {"id": 1}, {"id": 2}, {"id": 3},
52     {"id": 4}, {"id": 5}, {"id": 6}, {"id": 7},
53     {"id": 8}, {"id": 9}, {"id": 10}, {"id": 11},
54     {"id": 12}, {"id": 13}
55   ]
56 }

```

Apéndice C

Código de algoritmo de asignación de recursos en C++

FIGURA C.1: Algoritmo First-Fit en C++ utilizando la biblioteca Flex Net Sim.

```

1  #include "../src/simulator.hpp"
2
3  BEGIN_ALLOC_FUNCTION(FirstFit) {
4      // Variables de control
5      int largoRuta;
6      std::vector<char> ordenBandas;
7      std::map<char, std::vector<bool>> estadoSlots;
8      int requerido;
9      int total;
10     int indice;
11
12     for (size_t r = 0; r < NUMBER_OF_ROUTES; r++){ // RBMLSA: -> R (Por cada ruta).
13
14         largoRuta = 0;
15         for (size_t l = 0; l < NUMBER_OF_LINKS(r); l++){
16             largoRuta += LINK_IN_ROUTE(r, l)->getLength();
17         }
18
19         ordenBandas = ORDEN(largoRuta, escenario);
20         for (size_t m = 0; m < NUMBER_OF_MODULATIONS; m++){
21             for (size_t b = 0; b < NUMBER_OF_BANDS(r, 0); b++){
22
23                 if (REQ_REACH_BDM(m, REQ_POS_BANDS(m)[ordenBandas[b]]) < largoRuta) continue;
24
25                 requerido = REQ_SLOTS_BDM(m, REQ_POS_BANDS(m)[ordenBandas[b]]);
26
27                 estadoSlots[ordenBandas[b]] =
28                     std::vector<bool>(LINK_IN_ROUTE(r, 0)->getSlots(ordenBandas[b]), false);
29
30                 for (size_t l = 0; l < NUMBER_OF_LINKS(r); l++) {
31                     for (size_t s = 0; s < LINK_IN_ROUTE(r, l)->getSlots(ordenBandas[b]); s++) {
32                         if (LINK_IN_ROUTE(r, l)->getSlot(s, ordenBandas[b]) == true){
33                             estadoSlots[ordenBandas[b]][s] = true;
34                         }
35                     }
36                 }
37
38                 total = 0;
39                 indice = 0;
40                 for (size_t s = 0; s < estadoSlots[ordenBandas[b]].size(); s++){
41                     if (estadoSlots[ordenBandas[b]][s] == false){
42                         total++;
43                     }
44                     else {
45                         total = 0;
46                         indice = s + 1;
47                     }
48                 }
49                 if (total == requerido){
50                     for (size_t l = 0; l < NUMBER_OF_LINKS(r); l++){
51                         ALLOC_SLOTS_BDM(LINK_IN_ROUTE_ID(r, l), ordenBandas[b], indice, requerido);
52                     }
53                     return ALLOCATED;
54                 }
55             }
56         }
57     }
58     return NOT_ALLOCATED;
59 }
60 END_ALLOC_FUNCTION

```

Apéndice D

Acceso a Datos y Código

Para garantizar la reproducibilidad completa de esta investigación, todos los materiales asociados han sido puestos a disposición pública en un repositorio de GitHub¹. Este repositorio contiene el código fuente completo del simulador implementado, junto con el conjunto de datos de entrada utilizados en las simulaciones y los resultados detallados de todos los experimentos realizados. Adicionalmente, se incluye documentación sobre la configuración de los experimentos y los scripts necesarios para el procesamiento y visualización de resultados. La disponibilidad de estos materiales permite a otros investigadores replicar los experimentos, validar los resultados obtenidos y construir sobre este trabajo para futuras investigaciones.

¹<https://github.com/MirkoZETA/multiband-eon-thesis.git>

Bibliografía

- [1] J. M. Simmons, «Introduction to Optical Networks,» en *Optical Network Design and Planning*. Cham: Springer International Publishing, 2014, págs. 1-23, ISBN: 978-3-319-05227-4. DOI: 10.1007/978-3-319-05227-4_1.
- [2] M. Clarke, «4 - The digital revolution,» en *Academic and Professional Publishing*, R. Campbell, E. Pentz e I. Borthwick, eds., Chandos Publishing, 2012, págs. 79-98, ISBN: 978-1-84334-669-2. DOI: 10.1016/B978-1-84334-669-2.50004-4.
- [3] M. K. Khan, «Importance of telecommunications in the times of COVID-19,» *Telecommunication Systems*, vol. 76, n.º 1, págs. 1-2, 2021. DOI: 10.1007/s11235-020-00749-8.
- [4] J. Krafft, «Profiting in the info-coms industry in the age of broadband: Lessons and new considerations,» *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 77, n.º 2, págs. 265-278, 2010, ISSN: 0040-1625. DOI: 10.1016/j.techfore.2009.07.002.
- [5] J. pyo Hong, «Causal relationship between ICT R&D investment and economic growth in Korea,» *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 116, págs. 70-75, 2017, ISSN: 0040-1625. DOI: 10.1016/j.techfore.2016.11.005.
- [6] H. Waldman, «The Impending Optical Network Capacity Crunch,» en *2018 SBFoton International Optics and Photonics Conference*, 2018, págs. 1-4. DOI: 10.1109/SBFoton-IOPC.2018.8610949.
- [7] E. Oughton, Z. Frias, T. Russell, D. Sicker y D. D. Cleevly, «Towards 5G: Scenario-based assessment of the future supply and demand for mobile telecommunications infrastructure,» *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 133, págs. 141-155, 2018, ISSN: 0040-1625. DOI: 10.1016/j.techfore.2018.03.016.
- [8] A. Kretsis, K. Christodouloupoulos, P. Kokkinos y E. Varvarigos, «Planning and operating flexible optical networks: Algorithmic issues and tools,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, n.º 1, págs. 61-69, 2014. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6710065.
- [9] International Telecommunication Union, «Measuring digital development: Facts and Figures 2023,» International Telecommunication Union, Ginebra, Suiza, Reporte, 2023. dirección: <https://www.itu.int/itu-d/reports/statistics/facts-figures-2023/>.
- [10] International Telecommunication Union, «Measuring digital development: Facts and Figures 2022,» International Telecommunication Union, Ginebra, Suiza, Reporte, 2022. dirección: <https://www.itu.int/itu-d/reports/statistics/facts-figures-2022/>.
- [11] D. Koh, «COVID-19 lockdowns throughout the world,» *Occupational Medicine (Oxford, England)*, mayo de 2020, ISSN: 0962-7480. DOI: 10.1093/occmed/kqaa073.
- [12] OECD, «Keeping the Internet up and running in times of crisis,» OECD, Paris, inf. téc., 2020. DOI: 10.1787/4017c4c9-en.

- [13] N. CEPAL. «Agenda digital para América Latina y el Caribe (eLAC2022).» (2020), dirección: <https://hdl.handle.net/11362/46439>.
- [14] A. Ozimek, «The Future of Remote Work,» *SSRN Electronic Journal*, 2020. DOI: 10.2139/ssrn.3638597.
- [15] B. C. Chatterjee y E. Oki, «Introduction to Optical Networks,» en *Elastic Optical Networks: Fundamentals, Design, Control, and Management*. CRC Press, 2020, págs. 1-11, ISBN: 978-0-429-46528-4. DOI: 10.1201/9780429465284.
- [16] B. Warf, «Telecommunications,» en *International Encyclopedia of Human Geography (Second Edition)*, A. Kobayashi, ed., 2nd, Oxford: Elsevier, 2020, págs. 207-212, ISBN: 978-0-08-102296-2. DOI: 10.1016/B978-0-08-102295-5.10139-8.
- [17] R. Wenzlhuemer, «The telegraph and globalization,» en *Connecting the nineteenth-century world: The telegraph and globalization*. Cambridge University Press, 2013, págs. 30-50, ISBN: 978-1-107-02528-8.
- [18] K. Kao y G. Hockham, «Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies,» *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 113, n.º 7, págs. 1151-1158, jul. de 1966, ISSN: 2053-7891. DOI: 10.1049/piee.1966.0189.
- [19] R. C. Alferness, «The Evolution of Optical Transport Networks,» en *Springer Handbook of Optical Networks*, B. Mukherjee, I. Tomkos, M. Tornatore, P. Winzer e Y. Zhao, eds., 2nd. Cham: Springer International Publishing, 2020, págs. 1-19, ISBN: 978-3-030-16250-4. DOI: 10.1007/978-3-030-16250-4_1.
- [20] A. Lord, Y. R. Zhou, R. Jensen, A. Morea y M. Ruiz, «Evolution from Wavelength-Switched to Flex-Grid Optical Networks,» en *Optical Networks*, Springer International Publishing, 2016, págs. 7-30. DOI: 10.1007/978-3-319-30174-7_2.
- [21] L. Al-Tarawneh, A. Alqatawneh, A. Tahat y O. Saraereh, «Evolution of optical networks: from legacy networks to next-generation networks,» *Journal of Optical Communications*, 2020. DOI: 10.1515/joc-2020-0108.
- [22] G. Keiser, «Wavelength Division Multiplexing (WDM),» en *Fiber Optic Communications*. Singapur: Springer Singapore, 2021, págs. 383-435, ISBN: 978-981-33-4665-9. DOI: 10.1007/978-981-33-4665-9_10.
- [23] B. Ramamurthy, H. Feng, D. Datta, J. Heritage y B. Mukherjee, «Transparent vs. opaque vs. translucent wavelength-routed optical networks,» en *OF-C/IOOC . Technical Digest. Optical Fiber Communication Conference, 1999, and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication*, vol. 1, 1999, 59-61 vol.1. DOI: 10.1109/OFC.1999.767791.
- [24] E. M. Tordera, R. Martinez, R. Munoz, R. Casellas y J. Sole-Pareta, «Improving IA-RWA algorithms in translucent networks by regenerator allocation,» en *2009 11th International Conference on Transparent Optical Networks*, 2009, págs. 1-4. DOI: 10.1109/ICTON.2009.5185061.
- [25] A. Lord, S. J. Savory, M. Tornatore y A. Mitra, «Flexible Technologies to Increase Optical Network Capacity,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 110, n.º 11, págs. 1714-1724, 2022. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3188337.
- [26] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord y S. B. Yoo, «Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?» *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, n.º 2, s12-s20, 2012. DOI: 10.1109/mcom.2012.6146481.
- [27] G. Bennett, K.-t. Wu, A. Malik, S. Roy y A. Awadalla, «A review of high-speed coherent transmission technologies for long-haul DWDM transmission at 100g and beyond,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, n.º 10, págs. 102-110, 2014. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6917410.
- [28] M. M. Hamdi, L. Audah, S. A. Rashid y M. A. Al-Mashhadani, «Coarse WDM in Metropolitan Networks: Challenges, Standards, Applications, and Future

- Role,» *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1530, n.º 1, pág. 012 062, abr. de 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1530/1/012062.
- [29] D. Zhang, D. Wang, M. Zuo et al., «Toward Manageable Cost-Effective 5G C-RAN: Semi-Active Front-Haul by Multi-Carrier Pilot-Tone OAM and MWDm,» *IEEE Wireless Communications*, vol. 30, n.º 5, págs. 58-66, 2023. DOI: 10.1109/MWC.003.2300034.
- [30] Z. Zheng, X. Zhou, K. Chen y L. Liu, «LAN Wavelength Division Multiplexer on Silicon-Lithium Niobate Hybrid Integration Platform,» *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 35, n.º 6, págs. 325-328, 2023. DOI: 10.1109/LPT.2023.3243477.
- [31] N. Sambo, A. Ferrari, A. Napoli et al., «Provisioning in Multi-Band Optical Networks,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, n.º 9, págs. 2598-2605, 2020. DOI: 10.1109/JLT.2020.2983227.
- [32] G. Bosco y J.-P. Elbers, «Optical Transponders,» en *Springer Handbook of Optical Networks*, Springer International Publishing, 2020, págs. 83-136. DOI: 10.1007/978-3-030-16250-4_4.
- [33] N. Guo, K. Zhang, Y. Li, N. Deng, S. K. Bose y G. Shen, «Impact of the band upgrade sequence on the capacity and capital expenditure of multi-band optical networks,» *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 15, n.º 10, E1-E17, 2023. DOI: 10.1364/JOCN.489998.
- [34] A. Napoli, N. Costa, J. K. Fischer et al., «Towards multiband optical systems,» en *Advanced Photonics 2018 (BGPP, IPR, NP, NOMA, Sensors, Networks, SPP-Com, SOF)*, OSA, 2018. DOI: 10.1364/networks.2018.netu3e.1.
- [35] O. Nyarko-Boateng, F. E. B. Xedagbui, A. F. Adekoya y B. A. Weyori, «Fiber optic deployment challenges and their management in a developing country: A tutorial and case study in Ghana,» *Engineering Reports*, vol. 2, n.º 2, feb. de 2020. DOI: 10.1002/eng2.12121.
- [36] P. J. Winzer y D. T. Neilson, «From Scaling Disparities to Integrated Parallelism: A Decathlon for a Decade,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, n.º 5, págs. 1099-1115, 2017. DOI: 10.1109/JLT.2017.2662082.
- [37] Ítalo Brasileiro, L. Costa y A. Drummond, «A survey on challenges of Spatial Division Multiplexing enabled elastic optical networks,» *Optical Switching and Networking*, vol. 38, 2020, ISSN: 1573-4277. DOI: 10.1016/j.osn.2020.100584.
- [38] V. Lohani, A. Sharma, Y. N. Singh, K. Akansha, B. S. Heera y P. Athe, *Optical Networks*, 2024. DOI: 10.48550/ARXIV.2408.07478. dirección: <https://arxiv.org/abs/2408.07478>.
- [39] F. I. Calderón, A. Lozada, D. Bórquez-Paredes et al., «BER-Adaptive RML-SA Algorithm for Wide-Area Flexible Optical Networks,» *IEEE Access*, vol. 8, págs. 128 018-128 031, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3008883.
- [40] S. Dixit, D. Batham y R. P. Narwaria, «Elastic Optical Network: A Promising Solution for Future Communication Networks Considering Differentiated CoS,» en *Machine Intelligence and Smart Systems*, S. Agrawal, K. Kumar Gupta, J. H. Chan, J. Agrawal y M. Gupta, eds., Singapore: Springer Nature Singapore, 2021, págs. 49-60, ISBN: 978-981-33-4893-6.
- [41] M. Jinno, «Elastic Optical Networking: Roles and Benefits in Beyond 100-Gb/s Era,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, n.º 5, págs. 1116-1124, 2017. DOI: 10.1109/JLT.2016.2642480.

- [42] M. Imran, P. M. Anandarajah, A. Kaszubowska-Anandarajah, N. Sambo y L. Potí, «A Survey of Optical Carrier Generation Techniques for Terabit Capacity Elastic Optical Networks,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, n.º 1, págs. 211-263, 2018. DOI: 10.1109/COMST.2017.2775039.
- [43] A. Souza, B. Correia, A. Napoli et al., «Cost analysis of ultrawideband transmission in optical networks,» *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 16, n.º 2, págs. 81-93, 2024. DOI: 10.1364/JOCN.503723.
- [44] J. M. Simmons, «Optical Network Elements,» en *Optical Network Design and Planning*. Cham: Springer International Publishing, 2014, págs. 25-87, ISBN: 978-3-319-05227-4. DOI: 10.1007/978-3-319-05227-4_2.
- [45] D. R. Heath, «7 - Optics and vision,» en *Telecommunications Engineer's Reference Book*, F. Mazda, ed., Butterworth-Heinemann, 1993, págs. 7-17-13, ISBN: 978-0-7506-1162-6. DOI: 10.1016/B978-0-7506-1162-6.50013-7.
- [46] ITU-T, «Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid,» Telecommunication Standardization Sector of ITU, Ginebra, Suiza, ITU-T G.694.1, 2020.
- [47] T. Hoshida, V. Curri, L. Galdino et al., «Ultrawideband Systems and Networks: Beyond C + L-Band,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 110, n.º 11, págs. 1725-1741, 2022. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3202103.
- [48] J. M. Simmons, «Regeneration,» en *Optical Network Design and Planning*. Cham: Springer International Publishing, 2014, págs. 147-185, ISBN: 978-3-319-05227-4. DOI: 10.1007/978-3-319-05227-4_4.
- [49] F. Shirin Abkenar y A. Ghaffarpour Rahbar, «Study and Analysis of Routing and Spectrum Allocation (RSA) and Routing, Modulation and Spectrum Allocation (RMSA) Algorithms in Elastic Optical Networks (EONs),» *Optical Switching and Networking*, vol. 23, págs. 5-39, 2017, ISSN: 1573-4277. DOI: 10.1016/j.osn.2016.08.003.
- [50] K. Wen, X. Cai, Y. Yin et al., «Adaptive Spectrum Control and Management in Elastic Optical Networks,» *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, n.º 1, págs. 39-48, 2013. DOI: 10.1109/JSAC.2013.130105.
- [51] A. Ferrari, A. Napoli, J. K. Fischer et al., «Assessment on the Achievable Throughput of Multi-Band ITU-T G.652.D Fiber Transmission Systems,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, n.º 16, págs. 4279-4291, 2020. DOI: 10.1109/JLT.2020.2989620.
- [52] R. Sadeghi, B. Correia, A. Souza et al., «Transparent vs Translucent Multi-Band Optical Networking: Capacity and Energy Analyses,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, n.º 11, págs. 3486-3498, 2022. DOI: 10.1109/JLT.2022.3167908.
- [53] A. Napoli, D. Rafique, M. Bohn, M. Nolle, J. K. Fischer y C. Schubert, «Transmission in Elastic Optical Networks,» en *Elastic Optical Networks: Architectures, Technologies, and Control*, V. López y L. Velasco, eds. Cham: Springer International Publishing, 2016, págs. 83-116, ISBN: 978-3-319-30174-7. DOI: 10.1007/978-3-319-30174-7_5.
- [54] E. Paz y G. Saavedra, «Maximum transmission reach for optical signals in elastic optical networks employing band division multiplexing,» *arXiv: Signal Processing*, 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2011.03671.
- [55] J. Walrand y P. Varaiya, «CHAPTER 7 - Wireless Networks,» en *High-Performance Communication Networks (Second Edition)*, J. Walrand y P. Varaiya, eds., Second Edition, San Francisco: Morgan Kaufmann, 2000, págs. 305-361, ISBN: 978-1-55860-574-9. DOI: 10.1016/B978-0-08-050803-0.50012-5.

- [56] O. Gerstel y S. Kutten, «Dynamic wavelength allocation in all-optical ring networks,» en *Proceedings of ICC'97 - International Conference on Communications*, vol. 1, 1997, págs. 432-436. DOI: 10.1109/ICC.1997.605331.
- [57] H. Zang, J. P. Jue y B. Mukherjee, «A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks,» en *Optical Networks Magazine*, 2000, págs. 47-60. dirección: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:7143139>.
- [58] A. Kretsis, K. Christodouloupoulos, P. Kokkinos y E. Varvarigos, «Planning and operating flexible optical networks: Algorithmic issues and tools,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, n.º 1, págs. 61-69, 2014. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6710065.
- [59] M. Zitkovich y D. Bórquez-Paredes, «Input Buffer in Dynamic Elastic Optical Networks,» en *2023 42nd IEEE International Conference of the Chilean Computer Science Society (SCCC)*, 2023, págs. 1-4. DOI: 10.1109/SCCC59417.2023.10315754.
- [60] J.-L. Izquierdo-Zaragoza, P. Pavón-Mariño y M.-V. Bueno-Delgado, «Distance-adaptive online RSA algorithms for heterogeneous flex-grid networks,» *2014 International Conference on Optical Network Design and Modeling*, págs. 204-209, 2014. dirección: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:2235904>.
- [61] D. J. Richardson, «Filling the Light Pipe,» *Science*, vol. 330, n.º 6002, págs. 327-328, 2010. DOI: 10.1126/science.1191708.
- [62] A. D. Ellis, N. M. Suibhne, D. Saad y D. N. Payne, «Communication networks beyond the capacity crunch,» *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 374, n.º 2062, pág. 20150191, mar. de 2016, ISSN: 1471-2962. DOI: 10.1098/rsta.2015.0191. dirección: <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2015.0191>.
- [63] D. Uzunidis, E. Kosmatos, C. Matrakidis, A. Stavdas y A. Lord, «Strategies for Upgrading an Operator's Backbone Network Beyond the C-Band: Towards Multi-Band Optical Networks,» *IEEE Photonics Journal*, vol. 13, n.º 2, págs. 1-18, 2021. DOI: 10.1109/JPHOT.2021.3054849.
- [64] A. Ghazisaeidi, I. Fernandez de Jauregui Ruiz, R. Rios-Müller et al., «Advanced C+L-Band Transoceanic Transmission Systems Based on Probabilistically Shaped PDM-64QAM,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, n.º 7, págs. 1291-1299, 2017. DOI: 10.1109/JLT.2017.2657329.
- [65] Infinera, *Windstream Deploys Infinera C+L Solution, Sets Foundation to Double Fiber Capacity*, Accessed: 2024-10-09, oct. de 2018. dirección: <https://www.infinera.com/press-release/windstream-deploys-infinera-c-l-solution-sets-foundation-double-fiber-capacity/>.
- [66] A. Agarwal, G. Misra y K. Agarwal, «A Review and Analysis on Elastic Optical Networks (EONs): Concepts, Recent Developments and Research Challenges,» *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, vol. 103, n.º 6, págs. 2189-2194, 2022. DOI: 10.1007/s40031-022-00802-x. dirección: <https://doi.org/10.1007/s40031-022-00802-x>.
- [67] A. Ferrari, A. Napoli, J. K. Fischer et al., «Upgrade Capacity Scenarios Enabled by Multi-band Optical Systems,» en *2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2019, págs. 1-4. DOI: 10.1109/ICTON.2019.8840550.
- [68] I. E. Fonseca, E. S. Gama, C. M. Oliveira et al., «The new problem of routing, wavelength and band assignment in MB-OFDM metropolitan networks,» en *2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, 2015, págs. 1-5. DOI: 10.1109/IMOC.2015.7369173.

- [69] C. F. Bogado-Martínez, D. P. Pinto-Roa y B. Barán, «Algorithms for Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Taxonomy,» *IEEE Access*, vol. 12, págs. 145 619-145 636, 2024. DOI: 10 . 1109 / ACCESS . 2024 . 3472651.
- [70] F. Calderón, A. Lozada, P. Morales et al., «Heuristic Approaches for Dynamic Provisioning in Multi-Band Elastic Optical Networks,» *IEEE Communications Letters*, vol. 26, n.º 2, págs. 379-383, 2022. DOI: 10 . 1109/LCOMM. 2021 . 3132054.
- [71] J. Shen, J. Chen e Y. Sun, «Fragmentation aware Routing and Spectrum Assignment algorithm for Elastic Optical Networks,» en *TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference*, 2015, págs. 1-4. DOI: 10 . 1109 / TENCON . 2015 . 7373114.
- [72] R. Emmerich, C. Schmidt-Langhorst, C. Schubert y R. Freund, «Characterization of C-Band Coherent Receiver Front-ends for Transmission Systems beyond S-C-L-Band,» *IEEE Photonics Technology Letters*, págs. 1-1, 2023. DOI: 10 . 1109/1pt . 2023 . 3312697.
- [73] B. Puttnam, R. Luís, G. Rademacher, M. Mendez-Astudilio, Y. Awaji y H. Furukawa, «S, C and Extended L-Band Transmission with Doped Fiber and Distributed Raman Amplification,» en *2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, ene. de 2021, págs. 1-3. DOI: 10 . 1364/OFC . 2021 . Th4C . 2.
- [74] J. F. Ó. Ramos, L. Cancela y J. Rebola, «Impact of the reconfigurable optical add-drop multiplexer architecture on the design of multi-band C+L+S optical networks,» *Optical Fiber Technology*, vol. 85, pág. 103 815, 2024, ISSN: 1068–5200. DOI: 10 . 1016/j . yofte . 2024 . 103815.
- [75] E. Berikaa, M. S. Alam, S. Bernal et al., «Next-Generation O-Band Coherent Transmission for 1.6 Tbps 10 km Intra-Datacenter Interconnects,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 42, n.º 3, págs. 1126-1135, 2024. DOI: 10 . 1109/JLT . 2023 . 3307504.
- [76] M. Komanec, D. Dousek, D. Suslov y S. Zvanovec, «Hollow-core optical fibers,» *Radioengineering*, vol. 29, n.º 3, págs. 417-430, 2020. DOI: 10 . 13164/re . 2020 . 0417.
- [77] G. T. Jasion, H. Sakr, J. R. Hayes et al., «0.174 dB/km Hollow Core Double Nested Antiresonant Nodeless Fiber (DNANF),» en *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2022*, Optica Publishing Group, 2022, Th4C.7. DOI: 10 . 1364/OFC . 2022 . Th4C . 7.
- [78] Y. Hadhbi, H. Kerivin y A. Wagler, «A novel integer linear programming model for routing and spectrum assignment in optical networks,» en *2019 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*, 2019, págs. 127-134. DOI: 10 . 15439/2019F188.
- [79] N. Sambo, B. Correia, A. Napoli et al., «Network upgrade exploiting multi band: S- or E-band?» *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 14, n.º 9, págs. 749-756, 2022. DOI: 10 . 1364/JOCN . 464386.
- [80] A. Mitra, D. Semrau, N. Gahlawat, A. Srivastava, P. Bayvel y A. Lord, «Effect of Channel Launch Power on Fill Margin in C+L Band Elastic Optical Networks,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, n.º 5, págs. 1032-1040, 2020. DOI: 10 . 1109/JLT . 2019 . 2952876.
- [81] A. Ferrari, M. Filer, K. Balasubramanian et al., «GNPy: an open source application for physical layer aware open optical networks,» *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 12, n.º 6, págs. C31-C40, jun. de 2020. DOI: 10 . 1364/JOCN . 382906.
- [82] M. Devigili, P. N. Goki, N. Sambo et al., «Multi-band Optical Network Assisted by GNPy: an Experimental Demonstration,» en *2022 IEEE Latin-American*

- Conference on Communications (LATINCOM)*, 2022, págs. 1-5. DOI: 10.1109/LATINCOM56090.2022.10000774.
- [83] A. D'Amico, V. Gatto, A. Nespola et al., «GNPy Experimental Validation in a C+L Multiband Optical Multiplex Section,» en *2024 24th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2024, págs. 1-4. DOI: 10.1109/ICTON62926.2024.10648172.
- [84] S. Sahu y J. C. Clement, «Deep learning techniques for quality of transmission estimation in optical networks,» *Optics Communications*, vol. 574, pág. 131 223, 2025, ISSN: 0030-4018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2024.131223>.
- [85] Z. Cai, Q. Wang, Y. Deng et al., «Domain adversarial adaptation framework for few-shot QoT estimation in optical networks,» *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 16, n.º 11, págs. 1133-1144, nov. de 2024. DOI: 10.1364/JOCN.530915.
- [86] I. Tomkos, S. Azodolmolky, J. Solé-Pareta, D. Careglio y E. Palkopoulou, «A tutorial on the flexible optical networking paradigm: State of the art, trends, and research challenges,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, n.º 9, págs. 1317-1337, 2014. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2324652.
- [87] P. Layec, A. Dupas, D. Verchère, K. Sparks y S. Bigo, «Will Metro Networks Be the Playground for (True) Elastic Optical Networks?» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, n.º 6, págs. 1260-1266, 2017. DOI: 10.1109/JLT.2017.2665783.
- [88] E. Riccardi, A. Pagano, E. Hugues-Salas et al., «Sliceable bandwidth variable transponders for elastic optical networks: The idealist vision,» en *2015 Fotonica AEIT Italian Conference on Photonics Technologies*, 2015, págs. 1-4. DOI: 10.1049/cp.2015.0110.
- [89] A. Lorences-Riesgo, D. Le Gac, M. Sales-Llopis et al., «Maximizing Fiber Capacity in Flex-Grid Coherent Systems Through Symbol Rate Optimization,» *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 34, n.º 3, págs. 161-164, 2022. DOI: 10.1109/LPT.2022.3142934.
- [90] L. Shen, N. Feng, Y. Liu et al., «ISRS impact-reduced routing, modulation, band, and spectrum allocation algorithm in C+L-bands elastic optical networks,» *Optical Fiber Technology*, vol. 82, pág. 103 640, 2024, ISSN: 1068-5200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2023.103640>.
- [91] Cisco, *IEEE 802.11 ax: The Sixth Generation of Wi-Fi*, 2020.
- [92] J. Shi, J. Yu, J. Zhang et al., «65 536-QAM OFDM signal transmission over a fiber-THz system at 320 GHz with delta-sigma modulation,» *Opt. Lett.*, vol. 48, n.º 8, págs. 2098-2101, abr. de 2023. DOI: 10.1364/OL.486349.
- [93] J. R. de Almeida Amazonas, G. Santos-Boada, S. Ricciardi y J. Solé-Pareta, «Technical challenges and deployment perspectives of SDN based elastic optical networks,» en *2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2016, págs. 1-5. DOI: 10.1109/ICTON.2016.7550418.
- [94] G. Kundimana y A. Vyukusenge, «Implementation Possibilities of Elastic Optical Networks Technology in Burundi Backbone Network,» en *2021 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*, 2021, págs. 1-6. DOI: 10.1109/EMCTECH53459.2021.9619177.
- [95] N. Charbonneau y V. M. Vokkarane, «A Survey of Advance Reservation Routing and Wavelength Assignment in Wavelength-Routed WDM Networks,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 14, n.º 4, págs. 1037-1064, 2012. DOI: 10.1109/SURV.2011.111411.00054.
- [96] Y. Ji, R. Gu, Z. Yang, J. Li, H. Li y M. Zhang, «Artificial intelligence-driven autonomous optical networks: 3S architecture and key technologies,» *Science*

- China Information Sciences*, vol. 63, n.º 6, pág. 160 301, mayo de 2020, ISSN: 1869–1919. DOI: 10.1007/s11432-020-2871-2.
- [97] K. Manousakis y G. Ellinas, «Crosstalk-Aware Routing Spectrum Assignment and WSS Placement in Flexible Grid Optical Networks,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, n.º 9, págs. 1477-1489, 2017. DOI: 10.1109/JLT.2017.2681943.
- [98] S. Fernández-Martínez, B. Barán y D. P. Pinto-Roa, «Spectrum defragmentation algorithms in elastic optical networks,» *Optical Switching and Networking*, vol. 34, págs. 10-22, 2019, ISSN: 1573-4277. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.osn.2019.04.001>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427718302042>.
- [99] P. Upadhyay, B. S. Heera e Y. N. Singh, «Fragmentation and Topology-Aware Spectrum Assignment in Elastic Optical Networks,» en *2024 16th International Conference on COMMunication Systems & NETWORKS (COMSNETS)*, 2024, págs. 752-755. DOI: 10.1109/COMSNETS59351.2024.10427429.
- [100] S. Petale, A. Knapinska, E. Erbayat et al., «PRODIGY+: a robust progressive upgrade approach for elastic optical networks,» *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 16, n.º 9, E48-E60, 2024. DOI: 10.1364/JOCN.525392.
- [101] S. Hosseini, I. de Miguel, N. Merayo, J. C. Aguado, O. G. de Dios y R. J. D. Barroso, «Migration of elastic optical networks to the C+L-bands subject to a partial upgrade of the number of erbium-doped fiber amplifiers,» *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 15, n.º 11, F22-F35, 2023. DOI: 10.1364/JOCN.493231.
- [102] E. Etezadi, F. Arpanaei, C. Natalino et al., «Joint Fragmentation- and QoT-Aware RBMSA in Dynamic Multi-Band Elastic Optical Networks,» en *2024 24th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2024, págs. 1-5. DOI: 10.1109/ICTON62926.2024.10648045.
- [103] P. Morales, P. Franco, A. Lozada et al., «Multi-band Environments for Optical Reinforcement Learning Gym for Resource Allocation in Elastic Optical Networks,» en *2021 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, 2021, págs. 1-6. DOI: 10.23919/ONDM51796.2021.9492435.
- [104] I. Angus, «An introduction to Erlang B and Erlang C,» *Telemanagement*, vol. 187, n.º 6, pág. 8, 2001.
- [105] M. Zitkovich y D. Bórquez-Paredes, «N-Try buffer allocation strategy for advanced reservation in dynamic Multiband-EON networks,» en *2024 24th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2024, págs. 1-4. DOI: 10.1109/ICTON62926.2024.10648141.
- [106] F. Falcón, G. España Herrera y D. Bórquez-Paredes, *Flex Net Sim: A Lightly Manual*, mayo de 2021.