

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales



Universidad
Nacional
de Córdoba



Tesis Doctoral

**Algoritmos para el Aprovechamiento
en Redes Ópticas Elásticas**

Autor: **Juan Nehuen Gonzalez Montoro**

Director: **Jorge M. Finochietto**

Julio de 2021

Algoritmos para el Aprovechamiento en Redes Ópticas Elásticas

Por

Juan Nehuen Gonzalez Montoro

Director

Jorge M. Finochietto

Comisión Asesora

Prof. Dr. Ing. Jorge M. Finochietto. FCEFyN, UNC

Prof. Dr. Ing. Mario Hueda. FCEFyN, UNC

Prof. Dra. Ing. Graciela Corral Briones. FCEFyN, UNC

Esta Tesis fue enviada a la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba como requisito parcial para la obtención del grado académico de Doctor en Ciencias de la Ingeniería.

Córdoba, Argentina
(1 de julio 2021)

Algoritmos para el Aprovisionamiento en Redes Ópticas Elásticas

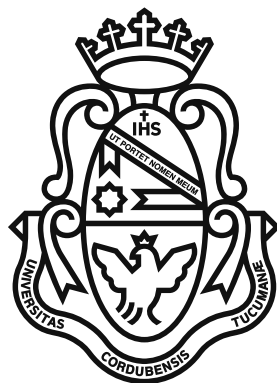
Ruteo y asignación de regeneración, modulación y espectro

por

JUAN NEHUEN GONZALEZ MONTORO

Bajo la dirección de

JORGE MANUEL FINOCHIETTO



Laboratorio de Comunicaciones Digitales
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Tesis para la carrera de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería.

CÓRDOBA - OCTUBRE 2020

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer especialmente a Jorge Finochietto por su guía y apoyo en este proceso. Como así también, por haberme brindado la oportunidad de formarme académicamente, profesionalmente y humanamente. Quiero extender el agradecimiento también al Profesor Andrea Bianco que me recibió en el Politécnico de Torino y que me ayudó enormemente en el desarrollo de este trabajo.

Quiero agradecer también al Laboratorio de Comunicaciones Digitales y a todos sus miembros por haberme acogido y haberme brindado un contexto excepcional para mi desarrollo profesional y académico. Trabajar en el laboratorio me permitió desempeñarme en proyectos de investigación, desarrollo y vinculación tecnológica. Entiendo que la formación recibida en este contexto trasciende lo académico y me ha brindado herramientas para mi desarrollo personal y por eso estoy enormemente agradecido.

Finalmente, agradezco a mi familia por haberme apoyado desde siempre en mis proyectos, en particular en el doctorado y por haberme brindado la contención emocional que necesité en el desarrollo de esta tesis.

RESUMEN

Las redes ópticas se han convertido en las últimas décadas en una infraestructura clave para el desarrollo de las sociedades modernas cuya demanda de tráfico siempre aumenta. Esta tendencia, que se ha mantenido por los últimos 20 años con incrementos del 30% anual, no parece remitir y en particular se espera en los próximos años aumentos en la demanda de tráfico debido principalmente a los servicios de video bajo demanda de alta calidad, el despliegue de las tecnologías 5G y del internet de las cosas. Las redes ópticas han atravesado una serie de evoluciones para poder cubrir estos requerimientos, en este contexto es que aparecen las redes elásticas ópticas como el candidato más aceptado para la próxima generación de redes de transporte. Estas redes basan su funcionamiento en una grilla flexible compuesta por slots de espectro, en el uso de transpondedores de ancho de banda variable y conmutadores ópticos de ancho de banda variable. Una demanda puede transportarse utilizando un número arbitrario de slots permitiendo así mejorar la eficiencia espectral y la flexibilidad de las asignaciones. Los transpondedores de ancho de banda variable admiten una gran configurabilidad permitiendo ajustar el ancho de banda utilizado a los requerimientos de la demanda y la distancia de transmisión así como también reconfigurarse para ajustarse a los cambios de estos requerimientos. Los conmutadores de ancho de banda variable permiten construir nodos que admiten subir y bajar señales en cualquier porción del espectro así como dejar pasar las señales pasantes en cualquier sección del espectro con anchos de banda arbitrarios de forma totalmente óptica. El uso de la grilla flexible introduce también una relación de compromiso entre el uso de regeneración y el uso de espectro, ya que al incluir regeneración se acortan las distancias de transmisión y se mejora la eficiencia espectral.

El aprovisionamiento en este tipo de redes consiste en encontrar una ruta y una asignación de recursos para una nueva demanda de tráfico representada por un nodo origen, un nodo destino y una tasa de transferencia demandada. Se espera que las demandas se presenten cada vez con más dinamismo. En este contexto el desafío del aprovisionamiento tiene dos objetivos complementarios, por un lado hacer un uso óptimo de los recursos para maximizar la cantidad de demandas servidas en cada momento y por otro lado la necesidad de hacerlo en tiempos reducidos para poder responder eficientemente a la dinámica de las redes. Las redes modernas dependen de algoritmos para enfrentar este problema. El problema del aprovisionamiento se divide en dos etapas, la de ruteo y la de asignación de recursos. La etapa de ruteo está dominada por la necesidad de garantizar la disponibilidad del servicio mientras que la asignación de recursos está dominada por la necesidad de hacer un uso racional de los recursos. En esta tesis realizamos aportes en ambas etapas del proceso de aprovisionamiento.

En primer lugar contribuimos al estudio de el problema del ruteo diverso. Haciendo foco en la búsqueda de caminos parcialmente disjuntos que garanticen un cierto nivel de disponibilidad. Los caminos parcialmente disjuntos tienen el potencial de proveer soluciones de costo mínimo para un requerimiento determinado de disponibilidad. En este contexto aportamos un enfoque nuevo para el cálculo de la disponibilidad de un servicio basado en la enumeración de escenarios

de falla relevantes. Mostramos que para redes de alta disponibilidad es posible aproximar la disponibilidad de un servicio en base a la probabilidad de falla de cierto conjunto de escenarios y que es posible acotar el error. Luego proponemos un algoritmo para encontrar un par de rutas parcialmente disjuntas que garanticen cierto grado de disponibilidad a un costo mínimo basado en esta estrategia. Comparamos su desempeño con un enfoque clásico de factorización y mostramos que es posible obtener buenos resultados reduciendo notablemente el tiempo de cómputo.

En cuanto a la etapa de asignación de recursos, estudiamos el problema de la asignación de regeneradores, formato de modulación y espectro haciendo énfasis en la asignación de regeneración y modulación. Los esquemas clásicos transparentes y opacos así como los algoritmos más avanzados existentes en la bibliografía se concentran en minimizar el uso de alguno de los recursos, ya sea espectro o transpondedores. En este sentido decimos que son agnósticos con respecto a los recursos disponibles. Se espera que las redes elásticas soporten tráficos muy dinámicos con arribos y liberaciones cada vez más frecuentes. Cuando una demanda libera recursos, estos pueden ser aprovechados por demandas futuras. En este contexto, en lugar de pensar el problema como un problema de minimización de costo proponemos pensarlo como un problema de asignación de recursos en dos dimensiones. Proponemos dos estrategias que hacen uso de este enfoque que llamamos conscientes de los recursos disponibles. Comparamos el desempeño de estas estrategias mediante simulaciones sobre tres topologías típicas de redes ópticas y mostramos que es posible con un enfoque consciente de los recursos disponibles minimizar la tasa de bloqueo independientemente del estado de la red y de las características de las demandas.

Finalmente aportamos un estudio sobre el impacto de las nuevas arquitecturas de transpondedores segmentables sobre el proceso de aprovisionamiento. Mostramos por simulación que estas arquitecturas no presentan ventajas desde el punto de vista de la probabilidad de bloqueo cuando se asumen conexiones transparentes. En cambio cuando se asume el uso de regeneración, la arquitectura segmentable permite compartir transpondedores. Esto implica que los regeneradores también se pueden compartir y por lo tanto la regeneración puede ser utilizada para mejorar la eficiencia espectral sin incurrir en un costo mayor. Mostramos que en redes elásticas equipadas con transpondedores segmentables utilizar conexiones translucidas permite disminuir la probabilidad de bloqueo incluso sin aumentar la cantidad de transpondedores desplegados.

A lo largo de esta tesis realizamos aportes en el proceso de aprovisionamiento en redes elásticas ópticas teniendo en cuenta sus principales desafíos. Estos son, hacer un uso racional de los recursos para maximizar la carga transportada y por otro lado mantener los tiempos de cómputo asociados al aprovisionamiento bajos.

ABSTRACT

Optical networks have become a key infrastructure for modern societies in the past decades. The worldwide traffic demand has increased by approximately 30% annually in the last 20 years and this trend is expected to continue, driven mainly by on demand high quality video streaming, 5G technologies and the Internet of Things. In order to cope with this ever increasing demand of traffic, optical networks have evolved through numerous generation. The most promising candidate as the next generation of transport networks is the Elastic Optical Network architecture. These kind of networks are based on a flexible grid of spectrum slots, bandwidth variable transponders and bandwidth variable spectrum switches. A traffic demand can be allocated using an arbitrary amount of contiguous spectrum slots, increasing the spectrum efficiency and flexibility compared to WDM/DWDM networks. Moreover, bandwidth variable transponder are becoming increasingly configurable enabling to adapt the required bandwidth to the demanded bitrate and the transmission distance. This also allows reconfiguration in order to adapt to changes on these factors. Bandwidth variable spectrum switches enable the use of new node architectures capable of adding, dropping and transparent switching superchannels in any portion of the spectrum and with arbitrary bandwidth. The adoption of a flexible grid generates a trade-off between the use of regeneration and the use of spectrum. Using regeneration shortens the transmission lengths permitting the use of higher order modulation formats, which increases the spectrum efficiency.

The provisioning process in elastic optical networks consists on finding a path and allocating resources for a new demand, represented by an origin node, a destination node and a required bitrate. Modern networks rely on algorithms to perform this task focusing on two steps, routing and resource allocation. The first step is dominated by the need of providing redundancy in order to guarantee a certain availability standard at minimum cost. The second step is dominated by the need of making a rational use of the available resources in order to maximize the carried traffic. In this thesis we make contributions in these two steps of the provisioning process.

First we contribute to the study of diverse routing, focusing on the partially disjoint paths that guarantee a certain level of availability problem. We develop a new approach for service availability calculation based on the enumeration of relevant scenarios. We show that in high availability networks it is possible to approximate the service availability based on the probability of certain failure scenarios. Furthermore, we demonstrate that in this case the error is bounded and can be computed. Based on this approach, we propose an algorithm that finds partially disjoint paths that guarantee a certain level of availability. We compare the performance of the novel strategy with a classic method based on factorization. By simulation over three example network topologies we show that the novel method yields results as good as the classic approach while highly reducing the computation time.

In the context of the resource allocation step, we study the regeneration, modulation and spectrum allocation problem. Classic strategies as the transparent and opaque approaches as

well as more advanced strategies proposed in the literature focus on minimizing one resource, either spectrum or transponders. We call these approaches *resource-agnostic*, since they do not take into account the available resources. In the near future it is expected that traffic demands will become increasingly dynamic, with both increased frequency and shorter holding times. When a demand releases a resource, this resource can be used by another demand. Therefore, we can envision the resource allocation problem as a two dimensional resource allocation problem instead of a cost minimization problem. Based on this idea, we propose two strategies that we call *resource-aware*. We compare the behaviour and performance of these strategies and the classic ones using simulation over three example network topologies. We show that for these three topologies it is possible to minimize the blocking rate using a *resource-aware* approach regardless of the network state and the demand requirements.

Finally, we contribute with a study of the impact of the new sliceable bandwidth variable transponder architecture on the provisioning process. We show by simulation that when all the provisions are made with transparent connections, the sliceability of transponders generates no advantage in terms of blocking probability. On the other hand, when regeneration is allowed, sliceable transponders enable transponder sharing between demands, which implies that regenerators can be shared and therefore the spectrum efficiency can be enhanced with no extra cost. We show that using translucent can minimize the blocking probability even with no cost increase when sliceable transponders are assumed.

Throughout this work, we make contributions to key challenges in the provisioning process of elastic optical networks. These challenges involve making a rational use of the resources in order to maximize the carried traffic and also minimizing the overall computation time of the whole process.

ÍNDICE GENERAL

	Página
Índice de Tablas	xi
Índice de Figuras	xiii
Acrónimos	xxii
1 Introducción y preliminares	1
1.1 Introducción	1
1.2 Problema de Investigación	2
1.2.1 Relevancia del problema	2
1.3 Hipótesis y Objetivos	3
1.3.1 Metodología de trabajo	3
1.4 Estructura General de la Tesis	3
1.5 Contribuciones	4
1.5.1 Ruteo	4
1.5.2 Asignación de recursos	4
2 Redes Ópticas	7
2.1 Introducción	7
2.2 Evolución de la transmisión óptica	7
2.2.1 Era de la regeneración	8
2.2.2 Era de los sistemas amplificados con dispersión controlada	10
2.2.3 Era de los sistemas coherentes	11
2.2.4 Era de la multiplexación espacial	12
2.3 Sistemas de transmisión modernos	13
2.4 Redes Ópticas de Transporte	15
2.5 Redes Ópticas Elásticas (EON)	18
2.5.1 Arquitectura de nodos	19
2.5.2 Transpondedores de ancho de banda variable	21
2.5.3 Regeneración	23

2.6	Aprovisionamiento de redes EON	25
2.6.1	Ruteo	25
2.6.2	Asignación de recursos	27
3	Ruteo en base a la disponibilidad	31
3.1	Introducción	31
3.1.1	Supervivencia	31
3.1.2	Disponibilidad	33
3.1.3	Ruteo en base a la disponibilidad	34
3.1.4	Organización del resto del capítulo	37
3.2	Disponibilidad de servicio	37
3.2.1	Enfoque por componentes	38
3.2.2	Enfoque por enumeración de escenarios	40
3.3	Ruteo en base a la disponibilidad	45
3.3.1	Definición del problema	45
3.3.2	Generación de escenarios	45
3.3.3	Formulación de programación lineal entera (<i>Integer Linear Programming</i>)	47
3.3.4	Método heurístico	48
3.3.5	Resultados numéricos	50
3.4	Conclusiones	56
4	Asignación de recursos	57
4.1	Introducción	57
4.1.1	Aprovisionamiento Transparente/Translucido	58
4.1.2	Trabajos relacionados	62
4.1.3	Nuestra contribución	63
4.1.4	Organización del resto del capítulo	64
4.2	Aprovisionamiento de ruta óptimo	64
4.2.1	Definición del problema	65
4.3	Modelo de sistema	68
4.3.1	Modelo de red	68
4.3.2	Modelo de BV-ROADM	69
4.3.3	Modelo de transpondedor	70
4.4	Selección de la opción de regeneración	71
4.4.1	Estrategia <i>Transparente</i>	72
4.4.2	Estrategia <i>Opaca</i>	72
4.4.3	Estrategia primero el mayor alcance FLR-RA	72
4.4.4	Estrategia primero la menor porción de espectro FNS-RA	72
4.4.5	Estrategia basada en umbral TH-RA	73

4.4.6	Estrategia basada en utilización UT-RA	74
4.5	Resultados	79
4.5.1	Algoritmo basado en umbral	80
4.5.2	Algoritmo basado en utilización	89
4.5.3	Consideraciones de complejidad	100
4.6	Conclusiones	105
5	Arquitectura de transpondedores	107
5.1	Introducción	107
5.1.1	Trabajos relacionados	108
5.1.2	Nuestra Contribución	109
5.1.3	Organización del resto del capítulo	109
5.2	Regeneración compartida	110
5.3	Modelo del sistema	112
5.3.1	Modelo de red	112
5.3.2	Modelo BV-ROADM	113
5.3.3	Modelo de transpondedor	113
5.3.4	Modelo de segmentación compartida	114
5.4	Estrategias de aprovisionamiento	115
5.5	Resultados	115
5.5.1	Análisis del efecto de los SBVTs	115
5.5.2	Comparación con la estrategia UT-RA	122
5.6	Conclusiones	129
6	Conclusiones	131
6.1	Perspectivas	132
	Apéndices	135
	A El modelo GN	137
	Bibliografía	143

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	Página
3.1 Probabilidad estacionaria de los escenarios	52
3.2 Probabilidad de todos los escenarios con r fallas	52
3.3 Probabilidad de todos los escenarios con $r = 3$ fallas	52

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	Página
2.1 Esquemático de un transmisor coherente	13
2.2 Esquemático de un receptor coherente	14
2.3 Esquemático de un OLT	16
2.4 Esquemático de un ADM O/E/O	17
2.5 Esquemático de un OADM	17
2.6 Esquemático de un ROADM, arquitectura de difusión y selección	20
2.7 Esquemático de un ROADM, arquitectura de conmutación de espectro	20
2.8 Esquemático de un BVT	22
2.9 Esquemático de un SBVT	22
2.10 Ejemplo de conexiones pasantes, regeneradas y con origen/destino local. Diagrama unidireccional.	24
3.1 Ejemplo de supervivencia a nivel de enlace y supervivencia a nivel de camino.	32
3.2 Disponibilidad de un enlace.	38
3.3 Disponibilidad de un camino único.	38
3.4 Disponibilidad de dos caminos disjuntos.	39
3.5 Disponibilidad de dos caminos parcialmente disjuntos.	40
3.6 Disponibilidad de un servicio.	41
3.7 Probabilidad estacionaria de un escenario en función del número de enlaces en estado de falla para una red de 200 enlaces.	42
3.8 Disponibilidad aproximada de un servicio.	43
3.9 Topologías utilizadas para el análisis	51
3.10 Costo normalizado versus disponibilidad objetivo. Topología COST266 con disponibilidad homogénea α , utilizando la formulación ILP	53
3.11 Costo normalizado y - Topología europea COST266 con disponibilidad aleatoria.	54
3.12 Costo normalizado y - Topología estadounidense US24 con disponibilidad aleatoria.	55
3.13 Costo normalizado y - Topología Argentina-CORE con disponibilidad aleatoria.	56

4.1	Ejemplo de aprovisionamiento Transparente en 4 pasos. 1) Dada una demanda y su camino. 2) Encontrar el formato de modulación de mayor orden en función de la tasa de bits demandada y la longitud del camino. 3) Determinar número de portadoras y cantidad de <i>slots</i> y tasa de transferencia de símbolos. 4) Asignar <i>slots</i> teniendo en cuenta <i>slots</i> ocupados, restricción de continuidad y restricción de contigüidad.	59
4.2	Ejemplo de aprovisionamiento Translucido en 4 pasos. 1) Dada una demanda y su camino. 2) Encontrar el formato de modulación de mayor orden para cada subcamino en función de la tasa de bits demandada y la longitud de cada subcamino. 3) Determinar número de portadoras y cantidad de <i>slots</i> y tasa de transferencia de símbolos para cada subcamino. 4) Asignar <i>slots</i> teniendo en cuenta <i>slots</i> ocupados, restricción de continuidad y restricción de contigüidad.	61
4.3	Opciones de aprovisionamiento	65
4.4	Opciones de aprovisionamiento, conjunto de Pareto	66
4.5	Estrategia base de aprovisionamiento	67
4.6	Estrategia en base a umbral	74
4.7	Estrategia de selección limitada en dos dimensiones	76
4.8	Estrategia de selección limitada en dos dimensiones con cómputo de umbrales en base a utilización	77
4.9	Topologías utilizadas para el análisis	80
4.10	Resultados para estrategias que minimizan el uso de transpondedores sobre la topología Europea COST266 bajo tráfico dinámico de <i>bitrate</i> mixto y sin límite al número de transpondedores por nodo. A) Tasa de bloqueo de <i>bitrate</i> vs carga, B) Número de regeneradores por demanda vs carga, C) Utilización de espectro vs carga, D) <i>slots</i> de espectro por demanda vs carga.	81
4.11	Resultados para estrategias que minimizan el uso de espectro sobre la topología Europea COST266 bajo tráfico dinámico de <i>bitrate</i> mixto y sin límite al número de transpondedores por nodo. A) Tasa de bloqueo de <i>bitrate</i> vs carga, B) Número de regeneradores por demanda vs carga, C) Utilización de espectro vs carga, D) <i>slots</i> de espectro por demanda vs carga.	84
4.12	Resultados de simulación para el algoritmo TH-RA para la topología Europea COST266 bajo tráfico dinámico de tasa de bits mixta y 20 transpondedores por nodo por grado del nodo. A) Tasa de bloqueo de <i>bitrate</i> vs Carga de la red, B) Número de regeneradores por demanda vs Carga de la red, C) <i>slots</i> de espectro vs Carga de la red.	86
4.13	Resultados de simulación para el algoritmo TH-RA para la topología Europea COST266 bajo tráfico dinámico de tasa de bits mixta, tasa de bloque de <i>bitrate</i> vs número de transpondedores por nodo por enlace para una carga constante de 250 Erlang.	88

4.14	Resultados de simulación para el algoritmo UT-RA para la topología Europea COST266 bajo tráfico dinámico de tasa de bits mixta y 20 transpondedores por nodo por grado del nodo. A) tasa de bloqueo de <i>bitrate</i> vs carga de la red B) Tasa de bloqueo de demandas vs carga de la red C) Tasa de bloqueo de espectro vs carga de la red, D) Tasa de bloqueo de transpondedores vs carga de la red.	91
4.15	Resultados de simulación para el algoritmo UT-RA para la topología Europea COST266 bajo tráfico dinámico de tasa de bits mixta y 20 transpondedores por nodo por grado del nodo. A) Tasa de bloqueo de demandas de 100G vs carga de la red, B) Tasa de bloqueo de demandas de 200G vs carga de la red. C) Tasa de bloqueo de demandas de 400G vs carga de la red.	92
4.16	Resultados de simulación para el algoritmo UT-RA para la topología Europea COST266 bajo tráfico dinámico de tasa de bits mixta y 20 transpondedores por nodo por grado del nodo. A) Utilización de espectro vs carga de la red, B) Utilización de transpondedores vs carga de la red, C) Longitud media de los caminos de las demandas aceptadas vs carga de la red, D) Cantidad de saltos promedio de los caminos de las demandas aceptadas vs carga de la red.	94
4.17	Resultados de simulación para el algoritmo UT-RA para la topología Europea COST266 bajo tráfico dinámico de tasa de bits mixta y 20 transpondedores por nodo por grado del nodo. Proporción de modulaciones vs Carga de la red para las estrategias <i>Transparente</i> , <i>Opaca</i> , FLR-RA, FNS-RA y UT-RA.	96
4.18	Resultados de simulación para el algoritmo UT-RA para la topología Europea COST266 bajo tráfico dinámico de tasa de bits mixta y transpondedores por nodo por grado del nodo limitados. Tasa de bloqueo de <i>bitrate</i> vs límite de transpondedores para cuatro cargas 250, 310 Erlang.	97
4.19	Resultados de simulación para el algoritmo UT-RA para la topología Estadounidense US24 bajo tráfico dinámico de tasa de bits mixta y 20 transpondedores por nodo por grado del nodo. A) Tasa de bloqueo de <i>bitrate</i> vs carga de la red, B) Cantidad de saltos promedio por demanda vs carga de la red, C) Utilización de espectro vs carga de la red, D) Utilización de espectro vs carga de transpondedores.	99
4.20	Resultados de simulación para el algoritmo UT-RA para la topología Argentina ARG-CORE bajo tráfico dinámico de tasa de bits mixta y 20 transpondedores por nodo por grado del nodo. A) Tasa de bloqueo de <i>bitrate</i> vs carga de la red, B) Cantidad de saltos promedio por demanda vs carga de la red, C) Utilización de espectro vs carga de la red, D) Utilización de espectro vs carga de transpondedores.	100
4.21	Resultados de simulación para el algoritmo UT-RA para las topologías COST266, US24 y ARG-CORE bajo tráfico dinámico de tasa de bits mixta y 20 transpondedores por nodo por grado del nodo. Tiempo de cómputo normalizado en ms por demanda vs carga. 101	

4.22	Topología utilizada para evaluar el efecto de la cantidad de saltos en el tiempo de cómputo. Red lineal con saltos de 300 km con $N = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11$ y 12 .	103
4.23	Resultados de simulación para tráfico dinámico de tasa mixta (100G, 200G, 400G) sobre topología lineal con 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12 nodos y saltos de 300 km, resultados para una tasa de bloqueo en el rango [0.01, 0.05]. A) Tiempo normalizado medio de cómputo en ms/demanda versus el número de nodos en la topología. B) Tiempo normalizado máximo en ms/demanda versus el número de nodos en la topología.	104
5.1	Aprovisionamiento de dos demandas de 400 Gb/s sobre un único camino de dos saltos utilizando BVTs y SBVTs, sin y con regeneración.	110
5.2	Aprovisionamiento de dos demandas de 400 Gb/s sobre caminos parcialmente disjuntos utilizando BVTs y SBVTs, sin y con regeneración.	112
5.3	Topologías utilizadas para el análisis	116
5.4	Resultados de simulación para la topología Europea COST266 bajo tráfico uniforme de 400G y transpondedores ilimitados de 2 portadoras cada uno. A) tasa de bloqueo de bitrate vs carga de la red B) Número de transpondedores por demanda vs carga de la red C) Porcentaje de portadoras en uso vs carga de la red, D) Porcentaje de portadoras inutilizadas vs carga de la red.	117
5.5	Resultados de simulación para la topología Europea COST266 bajo tráfico uniforme de 400G y transpondedores ilimitados por nodo de 4 portadoras cada uno. A) tasa de bloqueo de bitrate vs carga de la red B) Número de transpondedores por demanda vs carga de la red C) Porcentaje de portadoras en uso vs carga de la red, D) Porcentaje de portadoras inutilizadas vs carga de la red.	119
5.6	Resultados de simulación para la topología Europea COST266 bajo tráfico uniforme de tasa mixta (100G, 200G y 400G) y 80 transpondedores por nodo de 4 portadoras cada uno. A) tasa de bloqueo de bitrate vs Carga de la red B) Número de transpondedores por demanda vs Carga de la red C) Porcentaje de portadoras en uso vs Carga de la red, D) Porcentaje de portadoras inutilizadas vs Carga de la red.	120
5.7	Probabilidad de bloqueo en función del número de transpondedores por nodo bajo una carga de 260 Erlang para una matriz de tráfico uniforme de tasa mixta de 100, 200 y 400 Gb/s sobre la topología Europea COST266. Caso de número limitado de transpondedores por nodo.	121
5.8	Resultados de simulación para la topología Europea COST266 bajo tráfico uniforme de tasa mixta (100G, 200G y 400G) y transpondedores ilimitados por nodo de 2 portadoras cada uno para la estrategia UT-RA. A) tasa de bloqueo de bitrate vs carga de la red B) Número de transpondedores por demanda vs carga de la red C) Porcentaje de portadoras en uso vs carga de la red, D) Porcentaje de portadoras inutilizadas vs carga de la red.	124

5.9	Resultados de simulación para la topología Argentina CORE bajo tráfico uniforme de tasa mixta (100G, 200G y 400G) y transpondedores ilimitados por nodo de 2 portadoras cada uno para la estrategia UT-RA. A) tasa de bloqueo de bitrate vs Carga de la red B) Número de transpondedores por demanda vs Carga de la red C) Porcentaje de portadoras en uso vs Carga de la red, D) Porcentaje de portadoras inutilizadas vs Carga de la red.	125
5.10	Resultados de simulación para la topología Estadounidense US24 bajo tráfico uniforme de tasa mixta (100G, 200G y 400G) y transpondedores ilimitados por nodo de 2 portadoras cada uno para la estrategia UT-RA. A) tasa de bloqueo de bitrate vs Carga de la red B) Número de transpondedores por demanda vs Carga de la red C) Porcentaje de portadoras en uso vs Carga de la red, D) Porcentaje de portadoras inutilizadas vs Carga de la red.	126
5.11	Probabilidad de bloqueo en función del número de transpondedores por nodo bajo una carga de 260 Erlang para una matriz de tráfico uniforme de tasa mixta de 100, 200 y 400 Gb/s sobre la topología Europea COST266. Caso de número limitado de transpondedores por nodo.	128
A.1	<i>baudrate</i> y <i>bitrate</i> en función de la distancia de transmisión para un transpondedor de una portadora con tasa de símbolos máxima de 50 GBaud y 6 formatos de modulación (DP-BPSK, DP-QPSK, DP-8QAM, DP-16QAM, DP-32QAM y DP-64QAM). Asumiendo el modelo simplificado basado en el modelo GN descrito en este apéndice.	141

ACRÓNIMOS

16QAM modulación de amplitud en cuadratura de 16 símbolos, (*16 Quadrature Amplitude Modulation*). 12, 13, 18, 58, 60, 95, 96, 111

32QAM modulación de amplitud en cuadratura de 32 símbolos, (*32 Quadrature Amplitude Modulation*). 13, 60, 95

64QAM modulación de amplitud en cuadratura de 64 símbolos, (*64 Quadrature Amplitude Modulation*). 12, 13, 95

8QAM modulación de amplitud en cuadratura de 8 símbolos (*8 Quadrature Amplitude Modulation*). 66, 71, 95

AARFH ruteo en base a la disponibilidad con heurística de factorización (*Availability Aware Routing Factorization Heuristic*). 54

AARSEH ruteo en base a la disponibilidad con heurística de enumeración de escenarios (*Availability Aware Routing Scenarios Enumeration Heuristic*). 54, 55

ADM multiplexor con agregación y extracción de señales (*Add Drop Multiplexer*). 16

AWG Array Waveguide Grating. 16

BER tasa de error de bits (*Bit Error Rate*). 57, 80, 98, 116, 139

BFS algoritmo de búsqueda primero en anchura (*Breadth-First-Search*). 25, 26

BPSK modulación por desplazamiento de fase binaria (*Binary Phase-Shift Keying*). 70, 80, 98

BV-SSS conmutador selectivo por espectro de ancho de banda variable (*Bandwidth Variable Spectrum Selective Switch*). 1, 19, 20, 23

BV-ROADM multiplexor con agregación y extracción de señales óptico reconfigurable de ancho de banda variable (*Bandwidth Variable Reconfigurable Optical Add / Drop Multiplexer*). viii, ix, 19, 63, 69, 113

- BVT** transpondedor de ancho de banda variable (*Bandwidth Variable Transponder*). xvi, 1, 2, 3, 14, 19, 21, 22, 23, 28, 57, 62, 66, 70, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 115, 116, 117, 118, 119, 121, 122, 123, 125, 127, 128, 129, 132
- DSF** fibra corrida en dispersión (*Dispersion Shifted Fiber*). 9
- DSP** procesador digital de señales (*Digital Signal Processor*). 14, 21
- DWDM** multiplexación por división de longitud de onda densa (*Dense Wavelength Division Multiplexing*). v, 11, 14, 15, 16, 18, 27, 28, 45, 57, 107, 108
- EDFA** amplificador de fibra dopada con erbio (*Erbium Doped Fiber Amplifier*). 10, 11, 140
- EON** red óptica elástica (*Elastic Optical Network*). vii, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 18, 19, 21, 23, 25, 27, 28, 57, 58, 62, 63, 107, 108, 109, 110, 122, 129, 131, 132
- FDM** multiplexación por división de frecuencia (*Frequency Division Multiplexing*). 9
- FEC** corrección de errores hacia adelante (*Forward Error Correction*). 12, 14, 21, 66, 70, 71, 80, 98, 113, 116
- flex-grid** grilla flexible (*Flexible Grid*). 18, 57, 107
- FLR-RA** asignación de regeneradores primero el mayor alcance (*First Longest Reach Regenerator Assignment*). viii, xv, 71, 72, 82, 83, 88, 90, 93, 95, 96, 97, 98, 102, 103, 104, 105
- FNS-RA** asignación de regeneradores primero la menor porción de espectro (*First Narrowest Spectrum Regenerator Assignment*). viii, xv, 71, 72, 82, 84, 85, 88, 90, 91, 93, 95, 96, 97, 98, 102, 103, 104, 105
- FWM** mezclado de cuatro ondas (*Four Wave Mixing*). 11, 138
- ILP** programación lineal entera (*Integer Linear Programming*). viii, 47, 50, 52, 54, 55
- MCF-RA** asignación de regeneradores primero el mínimo número de portadoras (*Minimum Carriers First - Regenerator Assignment*). 115, 116, 117, 118, 119, 120, 122, 124, 126, 127, 128, 129, 132
- MILP** programación lineal mixta (*Mixed Integer Linear Programming*). 62
- MTTF** tiempo medio hasta la falla (*Mean Time To Failure*). 37
- MTTR** tiempo medio hasta la reparación (*Mean Time To Repair*). 37

OADM multiplexor con agregación y extracción de señales óptico (*Optical Add Drop Multiplexer*). 17

O-E-O regeneración Óptica - Eléctrica - Óptica. 8, 10, 17

OLT terminal de línea óptica (*Optical Line Terminal*). 16

OOK modulación por prendido y apagado (*On-Off keying*). 8

PDM multiplexación por división de polarización (*Polarization Division Multiplexing*). 70, 113

PMD dispersión por modo de polarización (*Polarization Mode Dispersion*). 11

QPSK modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (*Quadrature Phase-Shift Keying*). 13, 18, 70, 80, 98

RMSA asignación de ruta, modulación y espectro (*Route, Modulation and Spectrum Assignment*). 2, 62

ROADM multiplexor con agregación y extracción de señales óptico reconfigurable (*Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer*). 17, 18, 19, 37, 68

RP ubicación de regeneradores (*Regenerator Placement*). 62

RRMSA asignación de ruta, modulación y espectro (*Route, Regeneration, Modulation and Spectrum Assignment*). 2, 3, 25, 63

RSA asignación de ruta y espectro (*Route and Spectrum Assignment*). 2

RWA asignación de ruta y longitud de onda (*Route and Wavelength Assignment*). 2

SBVT transpondedor de ancho de banda variable segmentable (*Sliceable Bandwidth Variable Transponder*). ix, xvi, 2, 3, 4, 22, 23, 28, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 125, 127, 128, 129, 132

SLA acuerdo de nivel de servicio (*Service Level Agreement*). 26, 35, 36, 45, 48

SMF fibra monomodo (*Single Mode Fiber*). 140

TH-RA asignación de regeneradores basado en umbral de espectro (*Threshold Based Regenerator Assignment*). viii, xiv, 5, 63, 71, 72, 73, 74, 79, 80, 81, 82, 83, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 105, 131

UT-RA asignación de regeneradores basado en la utilización (*Utilization Based Regenerator Assignment*). ix, xv, xvi, xvii, 5, 6, 64, 71, 72, 74, 75, 76, 79, 80, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 108, 109, 115, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 131, 132

ACRONYMS

WDM multiplexación por división de longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexing*). v, 2, 9, 10, 11, 14, 15, 16, 18, 19, 29, 45, 57, 107, 108

WSS conmutador selectivo por longitud de onda (*Wavelength Selective Switch*). 18, 19

INTRODUCCIÓN Y PRELIMINARES

1.1 Introducción

En la última década las comunicaciones por fibra óptica alcanzaron su madurez y son utilizadas actualmente en todo el mundo como tecnología central en la infraestructura para las telecomunicaciones en diferentes jerarquías. En particular, las redes ópticas de transporte juegan un papel fundamental como infraestructura troncal a niveles nacionales e internacionales soportando tráfico de todo tipo. Debido a la necesidad siempre creciente de tráfico se han planteado diferentes estrategias a lo largo de los años para extraer la mayor capacidad de estas redes. A mediados de la década pasada se introdujo el concepto de redes elásticas de transporte que se basan en abandonar las grillas fijas de 50/100 GHz para adoptar una grilla flexible de 12.5 GHz para permitir hacer un uso más eficiente del espectro, donde las demandas se acomodan utilizando un número entero de *slots* de 12.5 GHz. A su vez las redes elásticas asumen una mayor flexibilidad y configurabilidad de los equipos de transmisión y conmutación. En los últimos años se han desarrollado transpondedores de ancho de banda variable BVTs que permiten acomodar diferentes tasas de transferencia con diferentes anchos de banda dependiendo de la distancia de transmisión entre otros parámetros y conmutadores selectivos por espectro de ancho de banda variable BV-SSS. En este contexto de siempre creciente flexibilidad y configurabilidad es que los algoritmos de aprovisionamiento toman especial importancia. La única forma de poder aprovechar al máximo toda la potencialidad de estas redes elásticas es mediante el uso de algoritmos que permitan optimizar y agilizar la forma en que las demandas son aprovisionadas. En esta tesis estudiamos el problema del aprovisionamiento en redes elásticas de transporte EONs.

1.2 Problema de Investigación

El aprovisionamiento en redes ópticas es un problema que ha sido largamente estudiado para las redes WDM y es conocido comunmente como el problema del ruteo y la asignación de longitud de onda (RWA). Este problema está dominado principalmente por la continuidad de la longitud de onda.

Con el cambio a la grilla flexible aparecieron nuevos desafíos relacionados con la asignación de espectro, principalmente con la fragmentación. Así el problema pasó a conocerse como ruteo y asignación de espectro (RSA) donde además de la continuidad de longitud de onda se agrega la limitación extra de la contigüidad de los *slots* de espectro.

Con la aparición de los transpondedores de ancho de banda variable BVTs el problema se volvió a modificar para incluir la selección del formato de modulación que está directamente relacionado con el ancho de banda necesario y, por lo tanto, con el número de *slots*. Así el problema pasó a conocerse como el problema de ruteo y asignación de modulación y espectro (RMSA).

Así mismo el uso de BVTs permite conseguir incrementar la eficiencia espectral mediante la inclusión de regeneradores que acortan las distancias de transmisión. En este contexto, el uso de regeneración volvió a tomar relevancia luego de muchos años en el olvido y el problema del aprovisionamiento pasó a incluir la asignación de regeneración como una parte integral para ser conocido como el problema del ruteo y asignación de regeneración, modulación y espectro RRMSA

Estos problemas son estudiados por lo general en línea, esto quiere decir que para cada nueva demanda de tráfico se busca un camino y una asignación de recursos. Existen trabajos que estudian estos problemas de manera fuera de línea, que quiere decir que estudian cómo realizar una asignación óptima para un gran conjunto de demandas en simultaneo con el objetivo de minimizar alguna métrica. Sin embargo, nosotros nos centramos en el problema en línea de ruteo y asignación de regeneración, modulación y espectro RRMSA. Si bien es posible estudiar este problema como un todo, el enfoque clásico es dividirlo en dos etapas, el ruteo por un lado y la asignación de recursos por otro. En esta tesis estudiaremos estas dos etapas por separado y realizaremos aportes en ambas. Por un lado estudiaremos el problema del ruteo diverso con caminos parcialmente disjuntos para garantizar cierto requerimiento de disponibilidad. y en segundo lugar estudiaremos la asignación de regeneración, modulación y espectro para una demanda dado un camino para el caso de uso BVTs y para el caso de arquitecturas más avanzadas de transpondedores de ancho de banda variable segmentables SBVTs.

1.2.1 Relevancia del problema

El aprovisionamiento en redes ópticas ha sido siempre uno de los principales problemas de estudio en el área de la planificación y gestión de este tipo de redes. Con los años, la capacidad de reconfiguración remota de estas redes ha ido siempre en aumento y con la aparición de la arquitectura de redes ópticas elásticas EON esta tendencia se vuelve aún más marcada. Esto

ha generado la necesidad año tras año de contar con nuevos y más complejos algoritmos que permitan gestionar y asignar los recursos de forma óptima y cada vez con mayor dinamismo. Se espera que la velocidad con la que cambian las demandas sea cada vez más rápida imponiendo así además la necesidad de que los algoritmos puedan correr en tiempos cortos. En [48] se puede encontrar una revisión de las tecnologías habilitantes de las redes EON y de la importancia de los problemas de asignación de recursos. El problema de aprovisionamiento RRMSA ha sido estudiado en los últimos años en [14, 15, 18, 19, 26, 31, 36, 43, 70, 72].

1.3 Hipótesis y Objetivos

Nuestra hipótesis de trabajo en la que nos basamos es que es posible mejorar la capacidad, adaptabilidad y agilidad de las redes elásticas de transporte mediante el diseño de algoritmos que tomen en cuenta el estado de los recursos disponibles y las nuevas capacidades de configurabilidad de los dispositivos de red. Para probar esta hipótesis nos proponemos los siguientes objetivos secundarios

1. Comprender el estado del arte de las Redes Elásticas Ópticas EON.
2. Proponer mejoras en las dos etapas del aprovisionamiento, tanto en el problema de ruteo como en el problema de asignación de recursos.
3. Evaluar las nuevas arquitecturas de transpondedores que se han propuesto en los últimos años BVTs y SBVTs.
4. Desarrollar herramientas de simulación que nos permitan evaluar las propuestas y compararlas con las estrategias existentes.

1.3.1 Metodología de trabajo

Estudiamos por separado el problema del ruteo y el problema de asignación de recursos. En ambos casos utilizamos una metodología de trabajo similar: estudiar el estado del arte para luego implementar una herramienta de simulación que permita utilizar las estrategias preexistentes. Luego, con el entendimiento del problema y de las estrategias existentes, proponemos, implementamos y evaluamos soluciones alternativas. En todos los casos utilizaremos tres topologías de red típicas, una europea (COST266), una estadounidense (US24) y una argentina (Argentina CORE), [28].

1.4 Estructura General de la Tesis

Esta tesis se estructura en 6 capítulos, el presente de introducción, el segundo que es una revisión de las redes ópticas, 3 capítulos principales y las conclusiones. En el Capítulo 2 realizamos una

revisión histórica de la evolución de las redes óptica y presentamos la arquitectura de las redes elásticas ópticas. Cada uno de los tres capítulos principales está autocontenido y representa un aporte en particular. En el Capítulo 3 estudiamos el problema del ruteo diverso con el objetivo de obtener rutas parcialmente disjuntas que garanticen una disponibilidad a mínimo costo. En el Capítulo 4 estudiamos el problema de la asignación de recurso en redes elásticas óptica utilizando conexiones translúcidas. Finalmente, en el Capítulo 5 estudiamos el impacto de la utilización de transpondedores segmentables SBVTs en el proceso de aprovisionamiento y en la combinación con la regeneración, en particular el impacto de la regeneración compartida.

1.5 Contribuciones

Adoptamos el enfoque clásico de dividir el aprovisionamiento en redes elásticas ópticas EON en dos etapas, el ruteo y la asignación de recursos y realizamos aportes en ambas.

1.5.1 Ruteo

En el campo del ruteo estudiamos el problema del ruteo diverso, en particular el problema de encontrar dos rutas parcialmente disjuntas que garanticen un objetivo en términos de disponibilidad.

- Contribuimos con un nuevo enfoque para el cálculo de la disponibilidad de un servicio (conjunto de caminos) en redes de alta disponibilidad basado en la enumeración de escenarios relevantes que posibilita reducir fuertemente los tiempos de cómputo.
- Demostramos que en redes de alta disponibilidad es posible aproximar la disponibilidad de un servicio en base a la probabilidad de falla de un conjunto reducido de escenarios de falla y que el error se puede acotar.
- Redujimos los tiempos de cálculos en más de 100 veces en las tres redes de ejemplo (Red de interconexión Europea, Estadounidense y Argentina) con respecto al método clásico sin sacrificar la calidad de las soluciones mediante la aplicación de el enfoque propuesto en un algoritmo para la búsqueda de caminos parcialmente disjuntos que garanticen una disponibilidad objetivo, que es posible .
- Estos resultados fueron presentados en la conferencia internacional de diseño de redes de comunicaciones confiables (DRCN 2017) [29].

1.5.2 Asignación de recursos

En el campo de la asignación de recursos estudiamos el problema de la asignación de regeneración, modulación y espectro en redes elásticas óptica EON. Realizamos dos conjuntos de contribuciones, en primer lugar estudiamos un nuevo enfoque para el diseño de algoritmos de asignación de

recursos en redes EON y en segundo lugar estudiamos el impacto de las nuevas arquitecturas segmentables en el proceso de aprovisionamiento.

contribuciones en algoritmos de asignación de recursos

- Contribuimos con un nuevo enfoque para el desarrollo de algoritmos de asignación de recursos que llamamos *consciente de los recursos*. Este enfoque consiste en pensar el problema de asignación de recursos como un problema multiobjetivo de asignación multidimensional en lugar de pensarlo como uno de minimización de costo.
- Aportamos dos algoritmos conscientes de los recursos que llamamos asignación de regeneradores basado en umbral de espectro (*Threshold Based Regenerator Assignment*) (TH-RA) y asignación de regeneradores basado en la utilización (*Utilization Based Regenerator Assignment*) (UT-RA).
- Redujimos cientos e incluso en algunos casos miles de veces la probabilidad de bloqueo de nuevas demandas utilizando algoritmos conscientes de los recursos en las tres redes de ejemplo (Red de interconexión Europea, Estadounidense y Argentina).
- A diferencia de lo que sucede con los enfoques clásicos, utilizando algoritmos conscientes de los recursos es posible equiparar las tasas de bloqueo entre demandas con diferentes tasas y distancias de transmisión.
- Estos resultados fueron presentados parcialmente en la conferencia global de comunicaciones (GLOBECOM 2018) [31] y actualmente hemos volcado todos los resultados presentados en esta tesis en un trabajo que se encuentra en proceso de revisión para su publicación.

contribuciones en la asignación de recursos con nuevas arquitecturas segmentables

- Con el objetivo de aportar un estudio que consideramos sumamente importante y que no había sido realizado en el pasado (hasta donde nuestro conocimiento abarca) aportamos un estudio acerca del impacto de las arquitecturas segmentables [25, 64] en el proceso de aprovisionamiento en redes EON.
- Contribuimos con una caracterización del impacto de las nuevas arquitecturas segmentables en los procesos de asignación de recursos. Estas arquitecturas permiten compartir recursos entre demandas aumentando aún más la complejidad del proceso de aprovisionamiento.
- Mostramos que las arquitecturas segmentables no mejoran la probabilidad de bloqueo si se utilizan esquemas de asignación de recursos clásicos y que, por lo tanto, es necesario mejorar estos esquemas para sacar provecho de todas sus potencialidades.

- Mostramos que el uso de esquemas de asignación de recursos con regeneración compartida reduce en más de diez veces las tasas de bloqueo de nuevas demandas en las tres redes de ejemplo (Red de interconexión Europea, Estadounidense y Argentina)
- Mostramos que, a diferencia de lo que sucede con las redes que no admiten segmentación, es posible reducir la probabilidad de bloqueo sin incurrir en un costo mayor en términos de equipamiento.
- Adaptamos el algoritmo consciente de los recursos UT-RA para aprovechar las ventajas listadas anteriormente y comparamos su desempeño. Mostramos que el algoritmo adaptado es capaz de reducir la probabilidad de bloqueo independientemente de la disponibilidad de transpondedores. Las ganancias rondan las diez veces cuando hay escasez de recursos y superan las cientos de veces cuando hay abundancia de recursos.
- Estos resultados fueron presentados parcialmente en la conferencia global de comunicaciones (GLOBECOM 2018) [31].

Como parte del trabajo, en este contexto, se realizó una colaboración con Prof. Dr. Andrea Bianco del Politécnico de Torino que incluyó una instancia de investigación de cuatro meses que concluyó con la publicación de dos trabajos en Globecom 2018 [31, 32].

REDES ÓPTICAS

2.1 Introducción

En este capítulo presentamos una breve revisión de las redes ópticas. En la Sección 2.2 revisamos la evolución de la transmisión óptica y de las tecnologías que habilitaron su utilización en las redes ópticas. En la Sección 2.3 realizamos una descripción de los sistemas de transmisión modernos. En la Sección 2.4 discutimos las redes ópticas de transporte y en la Sección 2.5 las redes ópticas elásticas EON, arquitectura de nodos, de transpondedores y regeneración. Finalmente, en la Sección 2.6 introducimos el aprovisionamiento en redes EON con algunos detalles sobre sus dos etapas: ruteo y asignación de recursos. Este capítulo es el marco teórico de la tesis que se complementa con la revisión bibliográfica contenida en cada capítulo específico.

2.2 Evolución de la transmisión óptica

Las fibras ópticas son delgados cables de vidrio que permiten transmitir señales en forma de luz. Están compuestas por un núcleo transparente rodeado de un revestimiento cuyas características físicas se diseñan específicamente para que puedan funcionar como guías de onda y que la luz incidente en un extremo quede confinada y viaje a lo largo de la fibra para luego ser detectada en el otro extremo. En la segunda mitad del siglo pasado se empezaron a utilizar las fibras ópticas para transportar información codificada en forma de luz. Una de las mayores ventajas de esta tecnología es que la señal puede viajar largas distancias sin degradarse considerablemente.

Hoy en día las comunicaciones por fibra óptica ocupan un lugar fundamental en la infraestructura mundial de telecomunicaciones y son utilizadas en diferentes jerarquías, desde la comunicación dentro de *data-centers* hasta las comunicaciones transoceánicas. Sin embargo, las comunicaciones ópticas han atravesado un largo camino desde los primeros despliegues

comerciales a fines de los años 70 [39] hasta el día de hoy. En esta sección haremos una revisión de esta evolución desde el punto de vista de la transmisión. El desarrollo de los sistemas de transmisión de fibra óptica han atravesado cuatro eras principales en los últimos 40 años según [4],[77].

- La era de la regeneración (1977 1995)
- La era de los sistemas amplificados con dispersión controlada (1995 2008)
- La era de los sistemas amplificados coherentes (2008 presente)
- La era de la multiplexación por división de espacio (en proceso de investigación)

2.2.1 Era de la regeneración

A inicios de los años 70 confluyeron una serie de tecnologías que hicieron posible el desarrollo de las primeras comunicaciones por fibra óptica. En primer lugar se empezaron a producir fibras ópticas basadas en silicio que presentan tres ventanas de baja pérdida centradas en los 0.8, 1.3 y 1.5 μm . Por otra parte, se contaba con emisores ópticos como leds y láseres semiconductores que permitían codificar datos binarios en forma de señales lumínicas prendiendo y apagando rápidamente estas fuentes, la señal lumínica que viajaba por la fibra podía ser luego detectada al otro extremo utilizando fotodetectores basados en semiconductores. Esta confluencia de tecnologías permitió un fuerte desarrollo a lo largo de la década de los 70 [75] para alcanzar el primer despliegue comercial de un sistema de 45 Mb/s [3] a inicios de los años 80.

Esta primera generación de sistemas funcionaban en la banda de los 0.8 μm sobre fibras multimodo con una pérdida de alrededor de 3 db/km utilizando modulación por prendido y apagado (*On-Off keying*) (OOK). La pérdida de 3 db/km que experimentan las señales ópticas en esta banda obligaban a incluir un regenerador cada 10 km. El tipo de regeneración utilizada es la que se conoce como regeneración Óptica - Eléctrica - Óptica (O-E-O). La señal era detectada y convertida al dominio eléctrico cada 10 km donde era reacondicionada y retransmitida para continuar su viaje por otros 10 km.

A esta altura uno de los principales impedimentos para aumentar la tasa de transferencia de los sistemas era la dispersión modal. Las fibras conocidas como multimodo poseen un núcleo relativamente grande con respecto a la longitud de onda de las señales que transportan permitiendo que la luz viaje en diferentes modos. Cada modo tiene una velocidad de propagación ligeramente diferente generando un ensanchamiento de los pulsos y limitando así la máxima tasa de transferencia.

Durante la segunda mitad de la década de los 80 se trabajó especialmente para aumentar las tasas de transferencia y disminuir los costos de despliegue y mantenimiento que estaban dominados por los regeneradores. Para lograrlo se movió la ventana de transmisión a los 1.3 μm y se empezaron a utilizar fibras monomodo. Al mover la ventana de transmisión a los 1.3 μm se

logró espaciar los regeneradores cada 40 km en lugar de 10 km disminuyendo en gran medida el costo asociado. A su vez, al utilizar fibras monomodo se elimina virtualmente la dispersión modal. Esto permitió que para principios de los años 90 se contara con sistemas ópticos de 2.5 GHz con regeneración cada 40 km con los primeros despliegues comerciales a mediados de los 90. La globalización y la expansión de empresas transnacionales impulsaron el despliegue de comunicaciones por fibra óptica tranocéánicas, como por ejemplo el sistema TAT-8 [2].

Para aprovechar la ventana de menor pérdida, a mediados de los años 90 se movió una vez más la ventana de transmisión a los 1.5 μm donde la fibra presenta una pérdida de tan solo 0.25 db/km permitiendo espaciar los regeneradores cada 80/100 km. Esto trajo aparejado el problema de la dispersión cromática. La dispersión cromática es generada por ciertas propiedades físicas de las fibras y es especialmente fuerte en los 1.5 μm . Las señales que viajan por la fibra tienen un determinado ancho de banda y las componentes de frecuencia viajan cada una a una velocidad ligeramente diferente, esto genera un ensanchamiento del pulso que también limita la tasa máxima de transferencia. Para lidiar con este problema se plantearon diferentes estrategias como el uso de fibra corrida en dispersión (*Dispersion Shifted Fiber*) (DSF) y la implementación de láseres de longitud de onda única. En el caso de las fibras DSF, fue una estrategia que prosperó debido a la gran cantidad de fibra ya desplegada.

El gran incremento de la tasa de transferencia de línea durante los años 90 trajo aparejado un problema de cuello de botella en los nodos. Las redes ópticas estaban basadas por ese entonces en sistemas electrónicos multiplexados por división de tiempo. Esto quiere decir que todo el tráfico que atravesaba un nodo debía ser convertido al plano electrónico, demultiplexado de forma electrónica, conmutado de forma electrónica incluso el tráfico que no tenía como terminación el nodo en cuestión. En otras palabras, cada nodo debía ser capaz de manejar de forma electrónica todo el tráfico que lo atravesaba. Este esquema no escalaba y en este contexto que se empieza a analizar el uso de multiplexación por división de longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexing*) (WDM) como alternativa. Que no es otra cosa que la adaptación a las transmisiones ópticas de la multiplexación por división de frecuencia utilizada ampliamente en las radiocomunicaciones (multiplexación por división de frecuencia (*Frequency Division Multiplexing*) (FDM)).

La estrategia WDM consiste en dividir el espectro disponible en la fibra en bandas de longitud de onda (o frecuencia) comúnmente llamadas longitudes de onda o simplemente lambdas. Cada banda o longitud de onda da soporte para un canal de comunicación independiente de los demás. Una de las ventajas directas de esta tecnología es que en lugar de usar un único canal a una alta velocidad es posible hacer que cada canal trabaje a una tasa menor y aporte al total. Esto redundante en menos requerimientos electrónicos ya que no hay una única electrónica teniendo que manejar toda la información a una tasa alta.

Existen dos tecnologías claves que hicieron posible la evolución y el desarrollo comercial del WDM, los láseres de longitud de onda única y los dispositivos de multiplexación y

demultiplexación óptica pasivos. Los primeros permiten, una vez calibrados, ajustar cada transmisión a un canal de la grilla WDM y los segundos agregar/desagregar los diferentes canales a/desde una fibra de una forma económica y sin grandes atenuaciones.

Sin embargo, los sistemas WDM deberían esperar a la aparición del amplificador óptico para convertirse en una opción viable ya que la necesidad de demultiplexar, regenerar cada señal por separado y luego multiplexar de nuevo cada 100 km los hacía inviables económicamente.

2.2.2 Era de los sistemas amplificados con dispersión controlada

La aparición de los amplificadores ópticos cambió radicalmente el esquema de costos y permitió la popularización y expansión de los sistemas WDM. Estos amplificadores ópticos permiten amplificar de forma conjunta un grupo de señales ópticas que se transportan en una misma fibra. De esta manera, es posible compensar la pérdida de transmisión en múltiples señales sin necesidad de demultiplexar ni de pasar al dominio eléctrico eliminando la necesidad de regeneradores O-E-O. El amplificador más utilizado es el amplificador de fibra dopada con erbio (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) (EDFA) introducido en 1987 [49]. Estos amplificadores se fabrican dopando una fibra de silicio con átomos de erbio. Utilizando una fuente externa estos átomos son excitados de su estado base a un estado de alta energía, cuando un fotón de la señal entrante impulsa a estos átomos a bajar a sus estado base estos emiten un fotón. De esta manera los fotones de la señal entrante disparan la emisión de nuevos fotones a partir de los átomos de erbio excitados logrando así una amplificación totalmente óptica de las señales. En otras palabras, cuando esta fibra dopada es excitada con un la luz de un intenso láser en la región de los 0.98 o 1.4 μm , el EDFA provee una amplificación óptica de 40 nm de ancho de banda centrada en los 1.55 μm . Esto permite amplificar toda la banda de los 1.5 μm de forma simultanea con ganancias de 20-30 dB con un consumo adecuado, permitiendo compensar alrededor de 100 km de transmisión.

Al remplazar los regeneradores por amplificadores es posible desplegar sistemas por cientos e incluso miles de kilómetros sin necesidad de abandonar el dominio óptico. Las señales montadas en diferentes longitudes de onda son multiplexadas en un extremo y transmitidas por la fibra. Los amplificadores ópticos permiten amplificar todas las longitudes de onda de forma conjunta que recién son demultiplexadas en el otro extremo de la fibra. Esto permitió también que las señales que no tienen como destino un nodo en particular puedan atravesarlo de forma transparente sin necesidad de ser procesadas de forma electrónica. Esto cambió el esquema de costos permitiendo escalar el volumen de tráfico de las redes disminuyendo el costo por bit/s significativamente. Ya para 1993 en el laboratorio se transmitían 8 señales de 10 Gb/s sobre 280 km de fibra con amplificación óptica y para 1995 ya se desplegaban los primeros sistemas comerciales soportando 8 canales de 2.5 Gb/s.

Los amplificadores ópticos permiten amplificar de forma simultanea múltiples longitudes de onda sobre una fibra sin necesidad de pasar al dominio eléctrico. La amplificación se da por completo en el dominio óptico de una forma muy eficiente y sin introducir prácticamente

interferencias en las señales independientemente de las tasas a las que trabajen. Esto permite agregar, quitar longitudes de onda de un sistema amplificado sin interferir con el resto de los canales y a su vez cambiar la tasa de transferencia de un canal sin interferir con los otros. Estas ventajas son las que hicieron posible el desarrollo de la tecnología WDM a nivel comercial. A partir de entonces la cantidad de canales ha ido aumentando hasta ocupar toda la banda de amplificación de los EDFAs. La grilla WDM cuenta con 40 canales de 100 GHz y la grilla DWDM con 80 canales de 50 GHz.

A fines de los 90 y principios de los años 2000 previo al desarrollo de la detección coherente el principal desafío eran los impedimentos físicos. Con la adopción de la amplificación óptica las señales viajan por centenas de kilómetros e incluso miles sin regeneración. En este contexto la dispersión cromática volvió a tomar relevancia así como también nuevos impedimentos. Como el caso del mezclado de cuatro ondas (*Four Wave Mixing*) (FWM) que es un efecto no lineal que genera que un conjunto de longitudes de onda cercanas generen nuevas longitudes de onda que potencialmente pueden interferir con las señales que transportan información. Este fenómeno es especialmente importante en las fibras desplazadas en dispersión. La solución técnica que se encontró en esta era previo a la implementación de la detección coherente, fue lo que se conoce como *chromatic dispersion management*. Esta técnica consiste en utilizar concatenaciones de fibras con valores de dispersión positiva y negativamente [16]. otro efecto especialmente perjudicial es el de dispersión por modo de polarización (*Polarization Mode Dispersion*) (PMD). Este efecto es generado por variaciones aleatorias de la birrefringencia de la fibra que genera retardos relativos impredecibles entre las dos polarizaciones. En la detección directa esto se manifiesta como un ensanchamiento del pulso que limita la máxima tasa de transferencia. En ese contexto una invención clave fue lo que se conoce como hilado (*spinning*), que consiste básicamente en someter un movimiento circular a las fibras durante la fabricación, [37].

2.2.3 Era de los sistemas coherentes

Para el inicio de los años 2000 la necesidad de aumentar la tasas de transferencia y de compensar las dispersiones cromáticas y por modo de polarización impulsaron el desarrollo de la detección coherente. Simultáneamente, los sistemas integrados en CMOS y los conversores AD y DA alcanzaron la capacidad de trabajar a una tasa de símbolos de 10 GBaud. Los receptores coherentes utilizan un oscilador local para bajar la señal a banda base con su campo óptico completo, su parte real e imaginaria en ambas polarizaciones. Estas cuatro señales son luego procesadas digitalmente. Disponer de la parte real e imaginaria en sus dos polarizaciones permite implementar formatos de modulación en cuadratura y compensar de forma digital la dispersión cromática, PMD, realizar filtrados e incluso compensar algunas no linealidades. Al implementar la transmisión coherente se logró alcanzar los 40 Gb/s utilizando un formato de modulación en cuadratura en doble polarización sobre una tasa de símbolos de 10 GBaud.

Para fines de la década de los 2000 ya se podía transmitir a 100 Gb/s sobre una sola portadora

a una tasa de símbolos de 28 GBaud y con esquemas de corrección de errores hacia adelante (*Forward Error Correction*) (FEC). En la última década se han ido desarrollando formatos de modulación cada vez más complejos y aumentando la tasa de símbolos. Utilizando una tasa de símbolos 56 GBaud y modulación de amplitud en cuadratura de 16 símbolos, (*16 Quadrature Amplitude Modulation*) (16QAM) en doble polarización se alcanzaron los 400 Gb/s [76] sobre una sola portadora. Para 2013 en el laboratorio ya se lograba transmitir a tasas de símbolos de 107 GBaud [60]. Para 2015 la barrera del Terabit por segundo sobre una longitud de onda se superó utilizando modulación de amplitud en cuadratura de 64 símbolos, (*64 Quadrature Amplitude Modulation*) (64QAM).

Sin embargo, el aumento del formato de modulación trae aparejado una disminución de la distancia alcanzable. Es así que hoy en día no se puede transmitir 400 Gb/s a más de 100 km sobre una sola portadora. El límite viene dado por la tasa de símbolos, que hoy en día está limitada por la velocidad de conversión de los conversores AD y DA. Esto ha hecho que en los últimos años se haya vuelto casi imposible aumentar la tasa de transferencia por portadora, lo que impulsó esquemas de multiplexación inversa utilizando múltiples portadoras, donde cada subportadora transporta una parte de la señal cliente. Se han implementado técnicas que permiten, utilizando conversores digitales-analógicos de alta velocidad, minimizar la separación entre subportadoras. Hoy en día existen sistemas comerciales que utilizan un esquema de 2x200 Gb/s y se espera ver en los próximos años transpondedores con mayor número de portadoras. Los transpondedores comerciales de hoy en día permiten configurar, la tasa de símbolos, el formato de modulación, la cantidad de portadoras y el esquema para la corrección de errores (FEC).

2.2.4 Era de la multiplexación espacial

Dado que se ha vuelto cada vez más difícil aumentar las tasas de transferencias por portadora alcanzando límites prácticamente en todas las dimensiones de multiplexación [77] se entiende en la comunidad que el único medio posible para aumentar significativamente las tasas de transferencias es mediante el paralelismo que provee la multiplexación por división de espacio.

La multiplexación por división de espacio consiste básicamente en utilizar cables de fibra óptica que provean caminos diversos espacialmente para poder enviar múltiples señales en la misma longitud de onda sin interferencias. Este es un campo de investigación que está actualmente en pleno proceso de generar consensos. Existen diferentes formas de proveer la multiplexación por división de espacio, para nombrar los más importantes: arreglos de fibras en paralelo, fibras multinúcleo y fibras con pocos modos. No ahondaremos más en esta era, sin embargo para encontrar mayor información referirse a [61], [77].

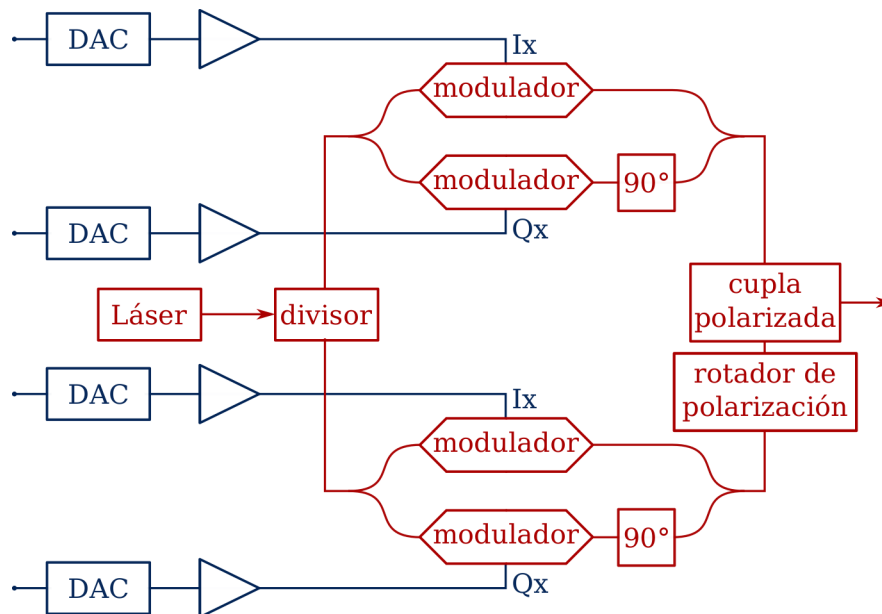


Figura 2.1: Esquemático de un transmisor coherente

2.3 Sistemas de transmisión modernos

Existen cuatro dimensiones fundamentales de multiplexación para la transmisión: espacio, longitud de onda, amplitud/fase y polarización. Utilizando detección coherente es posible utilizar esquemas de modulación en cuadratura que aprovechan la amplitud y la fase para generar constelaciones de N símbolos, por ejemplo: QPSK, 16QAM, 32QAM y 64QAM. A su vez, la utilización de la detección coherente permite hacer uso de la doble polarización en la dimensión de polarización. Sumado a estas dos dimensiones los transpondedores modernos hacen uso de la dimensión de la longitud de onda al utilizar múltiples portadoras desplazadas en frecuencia para transportar una única señal eléctrica.

En la figura 2.1 mostramos un esquemático de un transmisor coherente. El dominio eléctrico se muestra en azul y el dominio óptico en rojo. El transmisor utiliza cuatro moduladores ópticos para lograr las modulaciones en cuadratura por cada polarización. La luz del láser es dividida para alimentar la sección de cada polarización. Dentro de cada sección la luz se vuelve a dividir para alimentar el modulador en fase y el modulador en cuadratura. Luego la señal modulada del lado en cuadratura es desfasada 90° y combinada a la señal modulada en fase. Por último se utiliza una cupla polarizada para combinar las dos señales moduladas logrando así montar sobre una única portadora las dos polarizaciones. Variando las combinaciones de amplitud de I_x , Q_x , I_y y Q_y se logran construir los símbolos. Dependiendo de la modulación utilizada la cantidad de símbolos. La tasa con la que varían las combinaciones de estas cuatro señales de control constituye la tasa de símbolos que es controlada eléctricamente.

En la Figura 2.2 mostramos el esquemático de un receptor coherente. La señal recibida

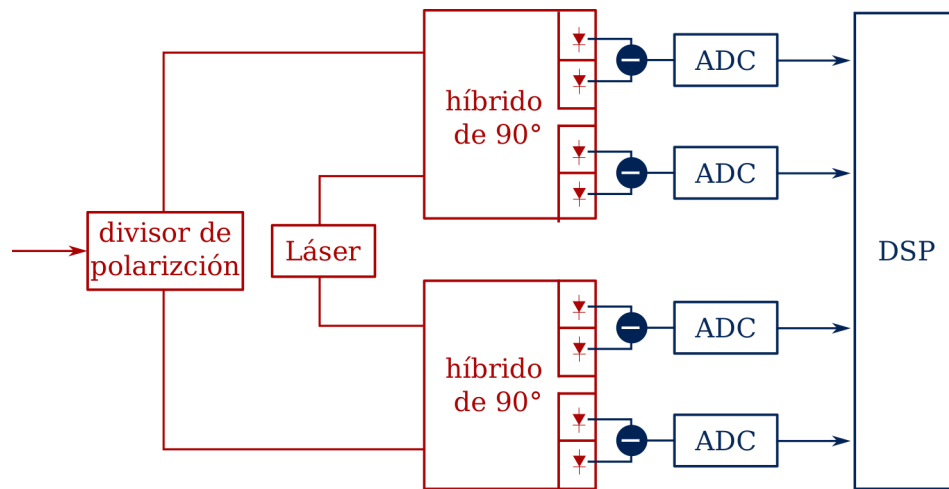


Figura 2.2: Esquemático de un receptor coherente

de la fibra es en primer lugar dividida con un divisor de polarización logrando separar las dos polarizaciones. Cada polarización es luego combinada con la luz del oscilador local en fase y cuadratura en un híbrido de 90° . Luego cada una de las señales es convertida al dominio eléctrico mediante un detector diferencial. Cada una de las cuatro señales es convertida al dominio digital utilizando un conversor analógico digital. El procesador digital de señales (*Digital Signal Processor*) (DSP) tiene acceso directo al campo óptico completo y puede recuperar las cuatro señales ortogonales. Se realizan compensaciones digitales de la dispersión, se recupera el sincronismo, se compensa la dispersión por modo de polarización y se demultiplexan las dos polarizaciones, se compensan las diferencias de frecuencia de los láseres, se estima la fase y finalmente se demodula. Finalmente, una vez recuperados los símbolos se aplica una corrección de errores FEC. Esta corrección de errores ha permitido mantener las tasas de errores de bits efectivos (post-FEC) en valores bajos (menores a 10^{-9}) con tasas de línea (pre-FEC) de entre 10^{-2} y 10^{-5} .

Un transpondedor coherente cuenta con un transmisor y un receptor además de las interfaces eléctricas para las señales clientes. Tradicionalmente los transpondedores eran construidos para una tasa de transferencia fija y limitados en ancho de banda para respetar la grilla fija de WDM o DWDM. Sin embargo, en los últimos años se han desarrollado transpondedores que admiten configurabilidad en ciertos parámetros, permitiendo así transmitir diferentes tasas de bits con anchos de banda variables. Esto se logra mediante la posibilidad de configurar la tasa de símbolos, la modulación y el overhead del FEC. Si a esto le sumamos la utilización de láseres tuneables obtenemos un transpondedor configurable, este tipo de transpondedores es conocido como transpondedor de ancho de banda variable (Bandwidth Variable Transponder, BVT). De esta manera es posible ajustar el formato de modulación y la tasa de símbolos dependiendo de la distancia de transmisión. Por ejemplo, para transmisiones de corta distancia es posible utilizar

modulaciones de alto orden para lograr una mayor tasa de bits o para reducir el espectro necesario para la transmisión, mientras que para distancias mayores es posible utilizar modulaciones de menor orden pero aumentar la tasa de símbolos para mantener cierta tasa de bits. Esta innovación vino aparejada de la implementación de la grilla flexible que se discutirá más adelante, por ahora alcanza con entender que esta nueva grilla permite mayor flexibilidad a la hora de asignar espectro. Por lo tanto, la utilización de este tipo de transpondedores permite reducir el uso de espectro.

Como ya mencionamos antes, para incrementar las tasas de bits manteniendo las distancias de transmisión se empezaron a desarrollar transpondedores multiportadora. Estos transpondedores consisten en múltiples transmisores/receptores en paralelo, cada uno en una longitud de onda diferente. La utilización de técnicas de conformación de espectro permiten juntar las diferentes portadoras sin interferencia pero también requieren del uso de procesamiento conjunto entre las diferentes portadoras. Esto permite generar los llamados supercanales de forma muy eficiente desde el punto de vista del espectro. Los supercanales son, en definitiva, canales de transmisión de ancho variable que pueden estar formados por múltiples portadoras adyacentes.

2.4 Redes Ópticas de Transporte

Las comunicaciones por fibra óptica son utilizadas en diferentes jerarquías desde las redes de acceso (por ejemplo fibra óptica hasta el hogar), pasando por las redes metropolitanas hasta las redes troncales nacionales e internacionales. Estas últimas son las conocidas como redes ópticas de transporte. En una primera generación de las redes ópticas de transporte las comunicaciones ópticas eran utilizadas únicamente de forma punto a punto entre nodos vecinos. Esto quiere decir que todo el tráfico transportado por una fibra era convertido al plano electrónico al arribar a un nodo y luego las tareas de conmutación y ruteo eran realizadas íntegramente en el plano eléctrico. La tecnología predominante en estas redes era la multiplexación por división de tiempo, por lo tanto cada fibra transportaba una única señal (o un número reducido de señales) de alta tasa de transferencia que a su vez transportaba múltiples señales de menor tasa de transferencia. Este esquema no escalaba debido a que era necesario que cada nodo fuera capaz de procesar de forma electrónica todo el tráfico que lo atravesaba.

La solución para este cuello de botella se dio gracias a la aparición del amplificador óptico que permite amplificar múltiples señales transportadas sobre una misma fibra de forma simultánea. Permitiendo que los sistemas WDM se convirtieran en opciones viables económicamente al reemplazar los regeneradores por amplificadores ópticos para compensar las pérdidas de la fibra. Además de disminuir los costos al reemplazar los regeneradores por amplificadores, la tecnología WDM permite que ciertas señales atraviesen un nodo íntegramente en el plano óptico (de forma transparente) sin ser convertidas al plano eléctrico salvando el cuello de botella que enfrentaban las redes que usaban multiplexación por división de tiempo. Las redes WDM/DWDM permiten

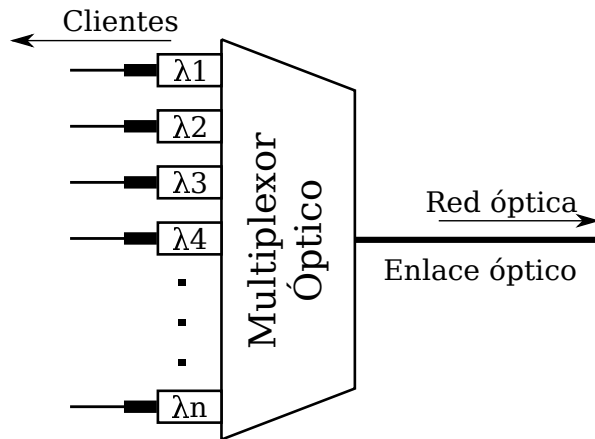


Figura 2.3: Esquemático de un OLT

acomodar por fibra óptica 40/80 canales de 100 GHz/50 GHz (4 THz de ancho de banda total) en la banda C ($1.5\mu\text{m}$). Estas dos opciones son conocidas como la grilla fija de WDM y de DWDM y en ambos casos cada señal ocupa un canal entero.

Las redes WDM/DWDM permiten mover las funciones de conmutación y ruteo al plano óptico teniendo en cuenta ciertas restricciones como son la continuidad de longitud de onda para una ruta, la no superposición de longitudes de onda y el alcance de transmisión. A continuación analizaremos algunos de los elementos de red que componen a estas redes para entender mejor el funcionamiento de las mismas.

El elemento de red más básico es el conocido como terminal de línea óptica (*Optical Line Terminal*) (OLT). En la Figura 2.3 mostramos un esquemático de un OLT basado en un multiplexor óptico. Este elemento puede ser conectado a la terminación de una línea de fibra óptica en un nodo. Está compuesto por un multiplexor óptico y un conjunto de transpondedores conectados del lado cliente y la fibra óptica del lado de línea. Estos dispositivos son bidireccionales. Todos los diagramas que mostramos en este capítulo son simplificados, a no ser que se diga lo contrario todos los diagramas representan dispositivos bidireccionales. Por lo tanto, el Multiplexor es en realidad la combinación de un multiplexor y un demultiplexor. Estos dispositivos se pueden construir de diferentes maneras, por ejemplo utilizando *arrayed waveguide gratings* (AWG) [23]. Los OLTs permiten multiplexar múltiples señales clientes sobre una única fibra utilizando WDM. Estos dispositivos son diseñados para ajustarse a la grilla ya sea WDM o DWDM, por lo tanto sus puertos están fijos en una longitud de onda y los transpondedores conectados a cada puerto deben coincidir con la longitud de onda del puerto.

En un nodo con más de un enlace de fibra se puede asignar un OLT en cada terminación. Este tipo de nodo es conocido como multiplexor con agregación y extracción de señales (*Add Drop Multiplexer*) (ADM). Permite con esto bajar/subir algunas longitudes de onda de forma local y algunas otras dejarlas pasar. En aquellos casos donde una longitud de onda atraviesa el nodo, como es el caso de λ_1 en el ejemplo, es posible no interferir con la señal óptica y permitir que esta

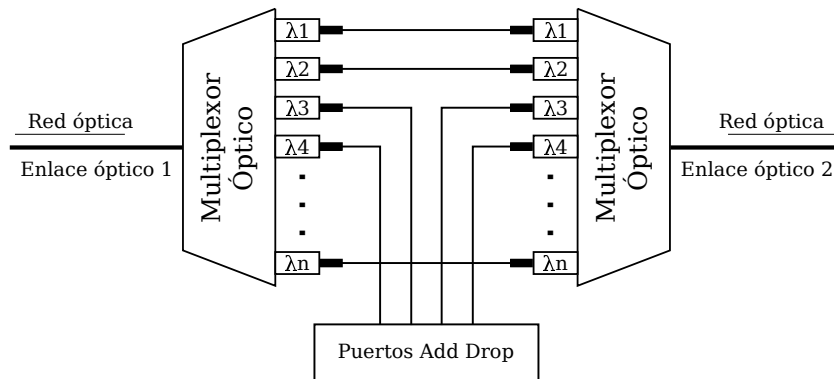


Figura 2.4: Esquemático de un ADM O/E/O

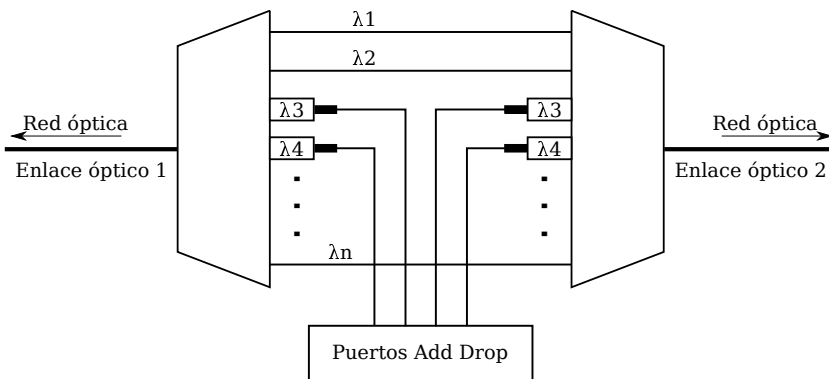


Figura 2.5: Esquemático de un OADM

atraviese el nodo sin conversión al dominio eléctrico, disminuyendo el costo de la arquitectura y dando lugar a su evolución el multiplexor con agregación y extracción de señales óptico (*Optical Add Drop Multiplexer*) (OADM).

Al retirar la conversión O-E-O aparece una restricción que es conocida como continuidad de longitud de onda, para aquellas señales que pasan de largo por un nodo de forma transparente la longitud de onda debe ser la misma en ambos enlaces. Esto permite reducir significativamente el número de transpondedores necesarios. La principal limitación de estos esquemas que pueden ser generalizados para nodos de mayor orden es que toda reconfiguración debe hacerse de forma manual conectando cables de fibra óptica. Existen otro tipo de arquitecturas para nodos OADM que no mencionaremos en este trabajo, consultar [67]. Sin embargo, todas las arquitecturas de OADM tienen la misma funcionalidad, permiten el paso de ciertas longitudes de onda de forma transparente con muy poca pérdida y bajar/subir otras longitudes de onda con reconfiguración manual.

La evolución de este tipo de nodos fue la de agregar reconfigurabilidad remota. Dando lugar a lo que se conoce como multiplexor con agregación y extracción de señales óptico reconfigurable (*Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer*) (ROADM). Estos nodos permiten el paso de

algunas longitudes de onda así como también agregar y/o extraer otras longitudes de onda con la capacidad extra de permitir configuración remota. Estos dispositivos se construyen remplazando el multiplexor por un conmutador selectivo por longitud de onda (*Wavelength Selective Switch*) (WSS). Los WSS permiten enviar cualquier longitud de onda presente en la línea hacia cualquiera de sus N puertos de salida. Además, la configuración de los caminos se realiza utilizando señales eléctricas. Existen diferentes formas de construir WSSs, por ejemplo utilizando MEMs o LCos. En la siguiente sección discutimos algunas arquitecturas de nodos ROADMs.

2.5 Redes Ópticas Elásticas (EON)

En los últimos años los transpondedores han evolucionado a partir de transpondedores de *bitrate* fijo, ancho de banda fijo y longitud de onda fija hasta alcanzar hoy en día una configurabilidad que los hace de *bitrate* variable, ancho de banda variable y longitud de onda variable. La posibilidad de configurar la longitud de onda se logra mediante el uso de fuentes ajustables como pueden ser los láseres tuneables. En cuanto a la configurabilidad del *bitrate* y el ancho de banda entran en juego diferentes factores como pueden ser, la tasa de símbolos, el formato de modulación, la cantidad de subportadoras y el uso de técnicas de corrección de errores (FEC). En la Sección 2.5.2 analizamos en detalle estos dispositivos, pero ahora nos alcanza con entender que estos pueden acomodar una tasa de transferencia utilizando el mínimo espectro posible en función de la distancia de transmisión. Esta flexibilidad derivó en que las redes tradicionales WDM/DWDM presenten ciertas limitaciones debido a su grilla fija. La primera limitación aparece cuando se transmite en una red WDM/DWDM una señal de bajo ancho de banda que no llega a ocupar el canal entero, en estos casos la grilla fija impone que el canal completo está en uso desperdiciando espectro a ambos lados de la señal. Por ejemplo una señal de 100 Gb/s, considerando una sobre tasa de 25 % para corrección de errores, utilizando una modulación QPSK en doble polarización requiere algo menos de 35 GHz de espectro que al acomodarla en un canal de 50 GHz genera un desperdicio del 43% del espectro del canal. La segunda limitación surge del hecho de que no es posible transmitir señales con tasas superiores a los 400 Gb/s a distancias considerables (utilizando QPSK o 16QAM) haciendo uso de un único canal de 50 GHz considerando una sobre tasa para corrección de errores alrededor del 25 %.

Para superar estas limitaciones Jinno et al. propusieron una nueva arquitectura de red conocida como redes ópticas elásticas (Elastic Optical Networks, EON) [38], [27]. Estas redes se basan en el uso de transpondedores de ancho de banda variable multiportadora y el uso de una nueva grilla de espectro llamada grilla flexible (*Flexible Grid*) (flex-grid). Esta grilla flexible divide la banda C en *slots* de 12.5 GHz y permite que una señal se transporte utilizando un número arbitrario de estos *slots*. Por ejemplo, una señal de 35 GHz de ancho de banda puede acomodarse utilizando tres *slots* de espectro reduciendo el desperdicio. Estos canales de ancho de banda arbitrario pueden conformarse con múltiples portadoras agrupadas, para diferenciarlos

de los canales convencionales de 50 o 100 GHz se los llama supercanales. Esta grilla permite también centrar los supercanales cada 6.25 GHz, reduciendo aún más el desperdicio. En ese trabajo seminal, los autores proponen las siguientes ventajas adicionales de las redes EON: permitir la convivencia de forma eficiente desde el punto de vista del espectro de señales de diferentes tasa de transferencia, responder a la relación de compromiso entre ancho de banda y alcance, permitiendo ahorrar espectro cuando las distancias de transferencia son cortas y de asignar el espectro necesario cuando las distancias sean largas y responder al comportamiento dinámico de las demandas, permitiendo modificar los requerimientos de espectro ante variaciones en las tasas demandadas.

Esta nueva arquitectura de redes se sostiene principalmente sobre dos dispositivos, el transpondedor de ancho de banda variable (*Bandwidth Variable Transponder*) (BVT) y del multiplexor con agregación y extracción de señales óptico reconfigurable de ancho de banda variable *Bandwidth Variable Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer* (BV-ROADM). En las redes WDM los ROADM se construyen utilizando WSS que son componentes diseñados para respetar la grilla fija. Más aún por la tecnología utilizada, estos dispositivos no pueden conmutar de forma eficiente anchos de banda variables. La introducción de la tecnología conocida como cristal líquido sobre silicio (*Crystal-Liquid-On-Silicon*) permite construir el conmutador selectivo por espectro de ancho de banda variable (*Bandwidth Variable Spectrum Selective Switch*) (BV-SSS). Este dispositivo permite conmutar porciones arbitrarias de espectro desde el puerto de línea hacia cualquiera de sus puertos.

2.5.1 Arquitectura de nodos

Existen diferentes propuestas para las arquitecturas de nodo basadas en BV-SSS. En este capítulo discutimos las dos arquitecturas más ampliamente aceptadas. En la Figura 2.6 mostramos la arquitectura de difusión y selección. Los diagramas mostrados en esta sección son unidireccionales, por lo tanto se muestran los dos sentidos de transmisión. Esta arquitectura utiliza un divisor en 1 en N en cada fibra entrante y un BV-SSS en cada fibra de salida. De esta manera, el espectro completo de cada entrada está disponible en cada BV-SSS de la salida y mediante la conmutación de estos se logran los ruteos. La mayor desventaja de esta arquitectura es que presenta una pérdida alta para los caminos pasantes, y esta aumenta con el grado del nodo.

La arquitectura de conmutación de espectro que se muestra en la Figura 2.7 permite superar este problema. Sin embargo, el costo es muy superior. Esta arquitectura reemplaza los divisores pasivos por BV-SSS, permitiendo que cualquier porción del espectro de las fibras de entrada sea conmutado hacia las fibras de salida con mínima pérdida.

La red de inserción y extracción puede construirse de diferentes maneras, pueden utilizarse multiplexores y divisores para agregar/extraer señales en cada BV-SSS. Este esquema tiene el problema de la pérdida de los divisores y el problema de la contención de longitud de onda. Un

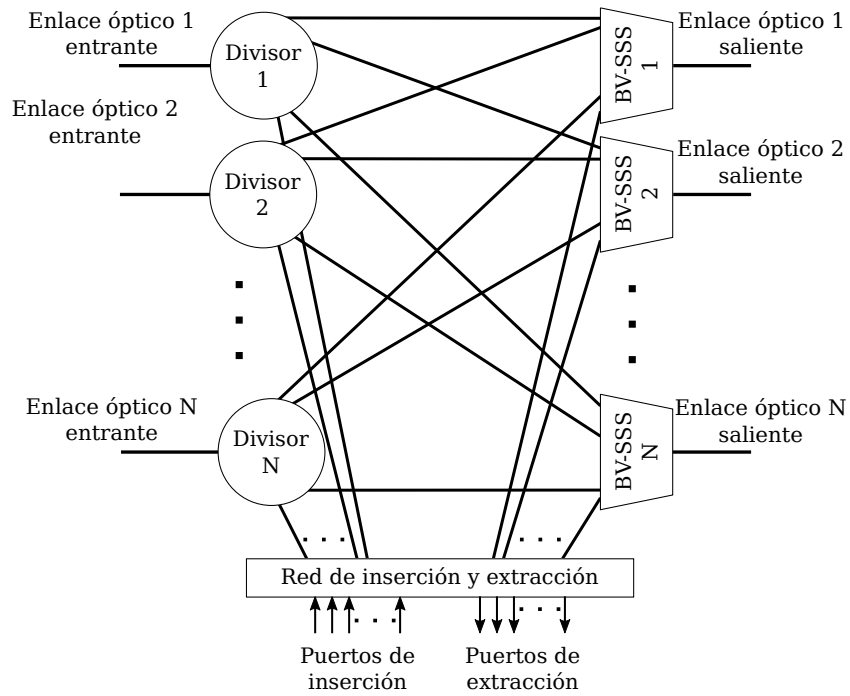


Figura 2.6: Esquemático de un ROADM, arquitectura de difusión y selección

esquema más avanzado puede contemplar el uso de BV-SSS para superar estas limitaciones.

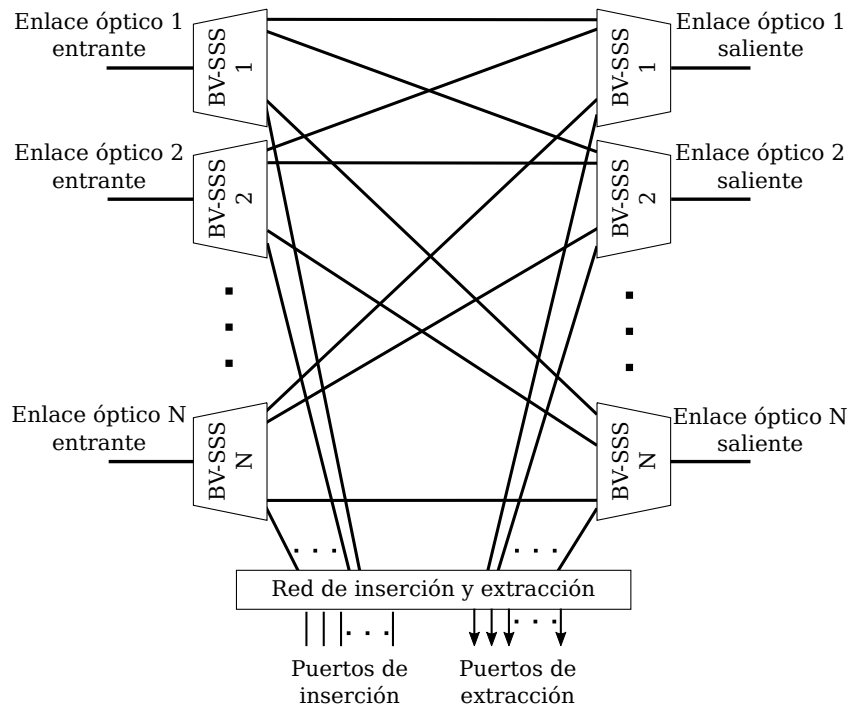


Figura 2.7: Esquemático de un ROADM, arquitectura de conmutación de espectro

2.5.2 Transpondedores de ancho de banda variable

Como mencionamos en la Sección 2.3 los transpondedores de ancho de banda variable BVT permiten transmitir/recibir señales a diferentes tasas de bits con la posibilidad de configurar por software la tasa de símbolos, el formato de modulación, el esquema de corrección de errores (FEC) y el número de portadoras. Con esto es posible ajustar tanto el ancho de banda y/o el alcance de la señal.

En la Figura 2.8 mostramos un esquemático de un transpondedor BVT genérico. El módulo de generación de subportadoras se encarga de generar las portadoras necesarias, M en este caso. Para este módulo es posible utilizar un arreglo de M láseres tuneables en paralelo o utilizar fuentes multi longitud de onda. El primer caso tiene la ventaja de que cada láser se puede fijar en una longitud de onda particular sin restricciones mientras que presenta la desventaja de que un desplazamiento en frecuencia de un láser puede generar interferencia con las portadoras adyacentes. En cambio, las fuentes multi longitud de onda permiten generar un número de longitudes de onda a partir de una única fuente, la ventaja de este método es que al estar ancladas las diferentes longitudes de onda un desplazamiento de la frecuencia del láser se traduce en un desplazamiento de todas las portadoras evitando así la interferencia, permitiendo también un acercamiento mayor de las portadoras adyacentes. Una revisión de las tecnologías disponibles para la generación multiportadora se puede encontrar en [48] en el capítulo 5 y 7.

Cada una de las subportadoras es modulada utilizando un módulo de subportadora compuesto por un DSP y un modulador I/Q con doble polarización como el que se mostró en la Sección 2.3. En la etapa de transmisión se aplican técnicas de moldeado de pulso para permitir una separación mínima entre portadoras [48, 63]. Cada módulo subportadora puede entenderse como un transpondedor de simple portadora que transporta una porción de la señal cliente. Finalmente, cada una de las señales es combinada en una única señal que es enviada hacia la línea. En la etapa de recepción la señal es dividida y luego cada subportadora es demodulada por separado, se compensan los efectos de los impedimentos físicos con técnicas de DSP se aplica la corrección de errores (FEC) y luego las señales se combinan para reconstruir la señal cliente. La interfaz cliente permite dividir la señal cliente en múltiples flujos que son enviados a los módulos de subportadora, si es posible utilizar menos portadoras que M entonces los módulos no utilizados se apagan.

Dada la amplia flexibilidad de estos dispositivos es posible transmitir una misma señal utilizando diferentes combinaciones de parámetros, en general no existe un consenso acerca de la mejor configuración posible. Un objetivo siempre presente es el de minimizar el espectro requerido por la transmisión, sin embargo existe una relación de compromiso entre el ancho de banda requerido y la longitud de transmisión. Los formatos de modulación de mayor orden permiten disminuir el ancho de banda requerido a tasa de símbolos constantes pero a su vez limitan la máxima longitud de transferencia alcanzable a una tasa de errores pre-FEC que permita satisfacer estándares de calidad de servicio. Existen tablas y modelos matemáticos

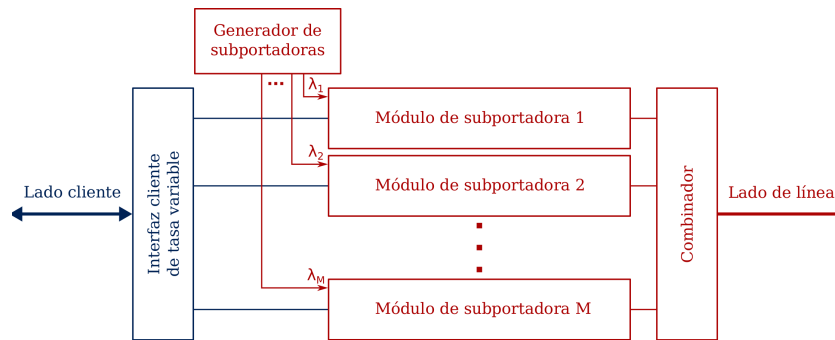


Figura 2.8: Esquemático de un BVT

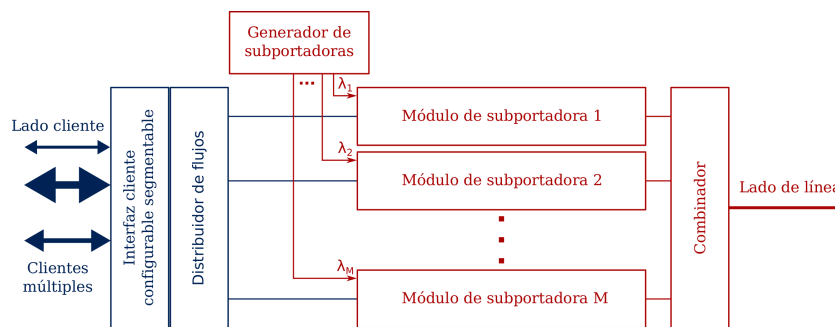


Figura 2.9: Esquemático de un SBVT

como el modelo GN [57] que permiten estimar de una manera confiable y sencilla la máxima longitud de transferencia para un formato de modulación. Una política viable para determinar la configuración de un BVT es entonces elegir el formato de modulación de mayor orden que permita alcanzar la longitud de transferencia y luego dada la tasa de símbolos máxima del transpondedor calcular la tasa de bits máxima por portadora y con ello el número de portadoras necesarias. De esta manera se utiliza el ancho de banda mínimo para la tasa de bits y la distancia demandada.

La necesidad de adaptabilidad de los BVT lleva a que en muchos casos un transpondedor tenga buena parte de sus recursos inutilizados, por ejemplo un BVT con capacidad de 4 portadoras que es utilizado para transmitir una señal que requiere una única portadora tendrá 3 módulos subportadora inutilizados. Esto llevó a la propuesta de admitir múltiples flujos cliente en un único transpondedor. A los transpondedores de ancho de banda variable que permiten hacer esto se los llama segmentables (Sliceable Bandwidth Variable Transponder, SBVT). Estos transpondedores, mediante una complejización de la interfaz cliente, permiten que los recursos no utilizados por una demanda sean aprovechados por otra.

En la Figura 2.9 mostramos un esquemático de esta arquitectura. La diferencia con respecto a un SBVT está en que la interfaz cliente debe permitir múltiples clientes de tasa variable y es necesario agregar un módulo que se encarga de la división de los flujos entre las subportadoras. Este módulo se encarga además de dividir los flujos de altas tasas en flujos más pequeños que se

asignan a cada subportadora. El número máximo de flujos que puede manejar un transpondedor de este tipo está limitado por el número de portadoras que puede manejar (M). Existen propuestas de SBVTs que replican el módulo mostrado en la figura N veces para lograr un transpondedor aún más flexible [63, 64], esa arquitectura requiere de una enorme matriz eléctrica para conmutar las señales eléctricas, sin embargo presenta la mayor capacidad de reconfiguración.

2.5.3 Regeneración

La regeneración de una señal sucede cuando en algún nodo a lo largo de la ruta de la conexión la señal óptica es convertida a una señal eléctrica y luego nuevamente convertida a una señal óptica nueva que continúa el camino. De esta manera, la conexión es dividida en dos señales ópticas que pueden tener características diferentes. La regeneración se logra extrayendo la señal óptica en un nodo mediante un puerto de extracción, luego la señal eléctrica es recuperada utilizando la etapa de recepción de un transpondedor, esa señal es convertida a una señal óptica nueva utilizando la etapa de transmisión de otro transpondedor para luego ser agregada mediante un puerto de inserción hacia la fibra de salida. Como todas las conexiones son bidireccionales, este proceso se realiza en ambas direcciones. La forma más sencilla de realizar la regeneración es la de colocar dos transpondedores espalda con espalda. Esto quiere decir que la señal eléctrica recuperada en un transpondedor es utilizada como señal entrante en la etapa de transmisión del otro y viceversa.

En la figura 2.10 mostramos un ejemplo de un nodo de grado N con la arquitectura de ruteo de espectro en el cual existen 3 conexiones. En rojo mostramos una conexión pasante desde el enlace 1 al enlace 2. Se muestran las dos direcciones, el espectro correspondiente a la conexión pasante en la fibra entrante del enlace 1 es redireccionado hacia la fibra saliente del enlace 2. Análogamente, el espectro correspondiente a la conexión pasante en la fibra entrante del enlace 2 es redireccionado hacia el enlace 1 en la dirección saliente. En violeta se muestra una conexión que tiene al nodo como origen/destino. La señal saliente del transpondedor BVT 3 se direcciona mediante la red de inserción y extracción hacia la BV-SSS del puerto de salida del enlace 1 donde es seleccionado el espectro correspondiente para que la señal salga por la fibra. El espectro equivalente es seleccionado en el conmutador de entrada del enlace 1 para redireccionarlo a la red de inserción y extracción donde es encaminado hacia la etapa de recepción del BVT 3. Por lo general, las dos direcciones de transmisión siempre usan el mismo espectro. Finalmente, está la conexión regenerada, la ruta ingresa al nodo por el enlace 2 y continua por el enlace N. En naranja mostramos las señales a un extremo del regenerador y en azul las señales al otro extremo del regenerador. El regenerador está conformado por dos BVTs conectados espalda con espalda. El BVT 1 recibe/envía desde/hacia el enlace N mientras que el BVT 2 recibe/envía desde/hacia el enlace 2. De esta manera la señal que llega desde el enlace 2 es recuperada a una señal eléctrica mediante la etapa de recepción del BVT 2 la señal eléctrica es utilizada por el BVT 1 para modular la señal azul que es redireccionada al puerto de salida del enlace N. En la

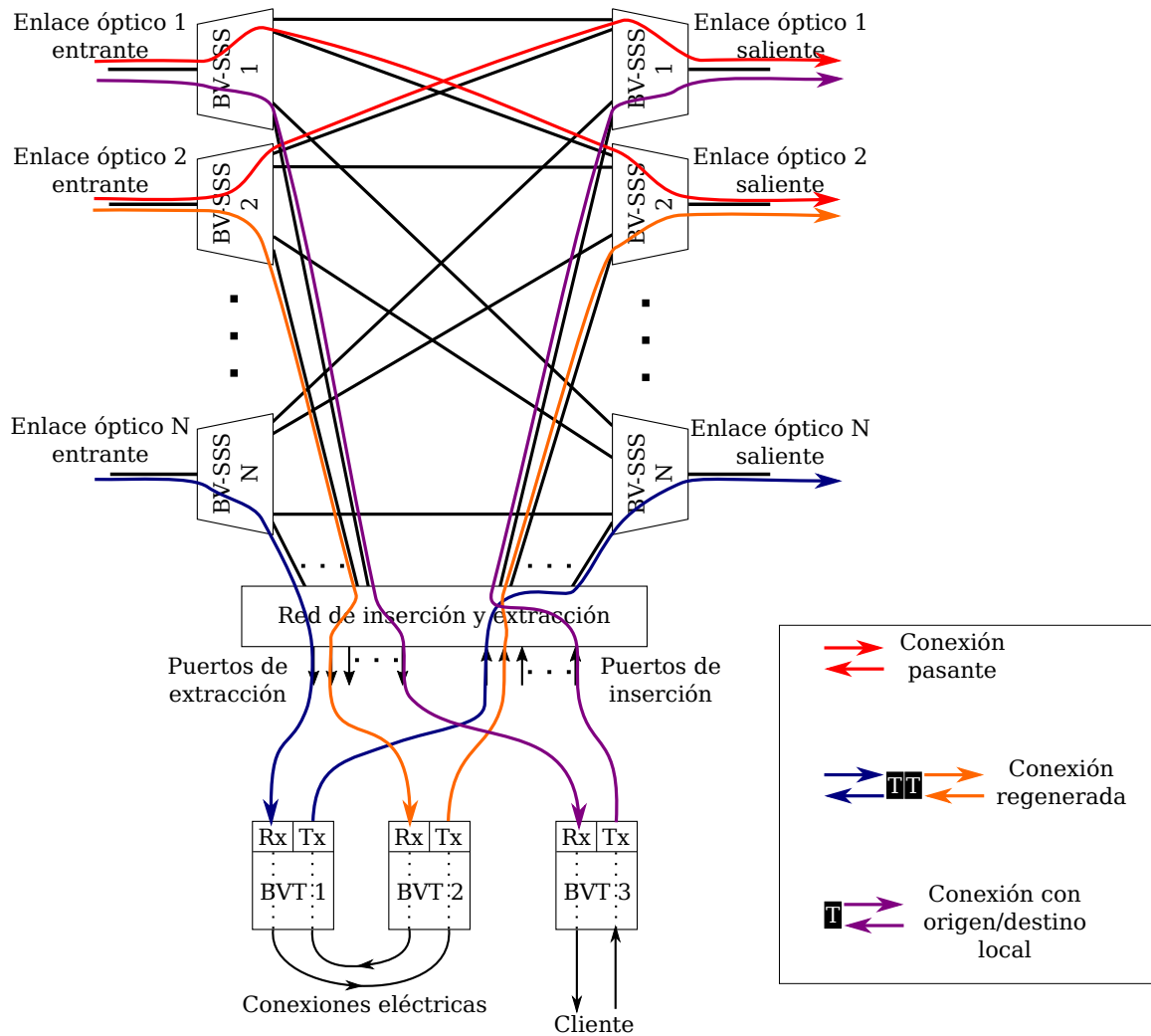


Figura 2.10: Ejemplo de conexiones pasantes, regeneradas y con origen/destino local. Diagrama unidireccional.

dirección contraria sucede lo análogo. De esta manera la conexión continúa su camino a través del nodo pero habiendo sufrido una regeneración. La regeneración permite aumentar la distancia total de la conexión, además permite modificar las características de las señales ópticas a un lado y otro del regenerador. Por ejemplo, la señal azul y la naranja pueden ocupar porciones diferentes del espectro e incluso tener un ancho de banda diferente.

Las conexiones eléctricas requeridas entre los dos transpondedores que conforman un regenerador pueden establecerse a demanda de forma manual, pueden estar predesplegadas o pueden realizarse remotamente mediante matrices de interconexión. En el caso de estar predesplegadas ciertos transpondedores están destinados a la regeneración de forma exclusiva mientras que en el caso de utilizar matrices de interconexión los transpondedores pueden ser compartidos para transmisión y/o para regeneración.

2.6 Aprovisionamiento de redes EON

La función principal de una red óptica de transporte es la de proveer servicio a ciertas demandas de tráfico. Estas demandas se caracterizan por un nodo origen, un nodo destino y una tasa de transferencia demandada. Las redes modernas dependen de algoritmos para encontrar la mejor forma de transportar estas demandas a lo largo de la red. El objetivo principal de estos algoritmos es la de optimizar el uso de recursos y de satisfacer ciertos estándares de calidad. Además, se requiere por lo general que estos algoritmos permitan encontrar soluciones muy rápidamente ya que en muchos casos estas demandas deben ser satisfechas con un retardo menor al segundo [67]. El proceso desde que una nueva demanda de tráfico llega hasta que empieza a cursar tráfico se conoce como aprovisionamiento, en su forma más general para redes EON este problema es el problema de asignación de ruta, modulación y espectro (*Route, Regeneration, Modulation and Spectrum Assignment*) (RRMSA). Este problema se divide por lo general en dos subproblemas, el problema del ruteo (R) y el problema de la asignación de recursos (RMSA). El primero consiste en encontrar una ruta desde el nodo origen hasta el nodo destino y el segundo en asignar puntos de regeneración, formatos de modulación y espectro.

2.6.1 Ruteo

El problema de ruteo sobre una red óptica consiste en encontrar una ruta desde el nodo origen hasta el nodo destino de la demanda. Este camino es una sucesión de enlaces y nodos que al atravesarlos en orden el nodo destino es alcanzado. En las redes ópticas de transporte los enlaces son bidireccionales y los nodos admiten el paso de señales pasantes. Por lo tanto, el problema del ruteo se puede modelar como el problema de encontrar una ruta sobre un grafo no direccionado desde un nodo origen a un nodo destino. Dada la naturaleza bidireccional de las demandas, el origen y el destino son intercambiables. Por lo general para elegir una ruta sobre todas las posibles rutas es necesario establecer una métrica a optimizar. Este problema ha sido ampliamente estudiado y existen algoritmos muy conocidos y eficientes.

2.6.1.1 Algoritmos de camino más corto

Algunas de las métricas más utilizadas para el ruteo son el número de saltos, la longitud del camino, congestión, costo económico, etc. Estas métricas tienen la particularidad de poder ser modeladas como métricas no negativas y aditivas. Esto quiere decir que el costo total de un camino será la suma de los costos de cada enlace. Cuando este es el caso existen algoritmos muy eficientes que permiten encontrar la ruta más corta, entendiendo como más corta a aquella ruta que minimiza la métrica. Los dos algoritmos más utilizados para encontrar la ruta más corta son el algoritmo de Dijkstra [22] y el algoritmo de búsqueda primero en anchura (*Breadth-First-Search*) (BFS) [51]. Ambos algoritmos proveen buenos resultados, pero en presencia de múltiples caminos

de igual costo BFS logra obtener el de menor cantidad de saltos por lo que en algunos casos es preferible utilizarlo en lugar de Dijkstra.

2.6.1.2 Algoritmos de los K caminos más cortos

En muchas situaciones es provechoso contar con un conjunto de caminos más cortos. Esto quiere decir los K caminos más cortos, no necesariamente todos con el mismo costo. Los dos algoritmos para búsqueda de los K caminos más cortos mas conocidos son el algoritmo de Yen [82] y el algoritmo de Eppstein [24]. Este último es general y permite encontrar los K caminos más cortos incluyendo bucles y el primero permite encontrar los k caminos más cortos sin ciclos (más adecuado para la aplicación sobre redes de telecomunicaciones).

2.6.1.3 Estrategias de ruteo

Simmons [67] propone clasificar las estrategias de ruteo en tres tipos:

- Ruteo Fijo: en esta estrategia la ruta se selecciona previamente a que ninguna demanda sea aprovisionada. Para cada par de nodos origen-destino se selecciona una ruta que es usada para todas las demandas con ese par origen-destino. La principal ventaja de esta estrategia es que el tiempo de obtención de ruta es prácticamente nulo. Mientras que el uso de esta estrategia puede derivar en problemas de congestión evitables.
- Ruteo Alternativo: en esta estrategia se selecciona un conjunto de rutas antes de que ninguna demanda sea aprovisionada. La diferencia con el caso anterior es que se genera un conjunto de rutas para cada par origen-destino. Luego cuando una demanda nueva llega se debe seleccionar una ruta del conjunto de rutas disponibles. Esto permite que la selección de la ruta dependa en cierto grado del estado de la red (congestión, fallas, etc).
- Ruteo dinámico: en esta estrategia la ruta se busca al momento en que la demanda llega. Esto permite tener en cuenta el estado de la red al momento de la demanda. Por ejemplo, es posible generar una topología auxiliar en donde los enlaces congestionados son retirados y luego realizar la búsqueda de la ruta. Esta estrategia es la que provee mayor flexibilidad a la hora de encontrar rutas.

2.6.1.4 Diversidad de rutas

Por lo general las redes de transporte deben cumplir con ciertas métricas de calidad de servicios estipuladas en un acuerdo de nivel de servicio (Service Level Agreement, SLA). Estos acuerdos incluyen entre otras cosas la cantidad de tiempo de inactividad que se puede admitir al año, por ejemplo 5 minutos al año. Estos requerimientos son tan estrictos que normalmente no es posible cumplirlos utilizando un único camino. Es necesario recurrir a esquemas redundantes, que para el problema de ruteo consiste en encontrar dos o más caminos parcial o totalmente disjuntos. El

problema clásico de ruteo en este contexto es el de encontrar dos caminos totalmente disjuntos. Esta disyunción puede limitarse a los enlaces o puede extenderse a los nodos. Los dos mejores algoritmos para encontrar el par de caminos disjuntos son el algoritmo de Suurballe [69] y el algoritmo de Bhandari [9]. Ambos realizan múltiples llamadas a algoritmos de camino más corto realizando modificaciones en el grafo entre llamada y llamada. Estos algoritmos garantizan que, de existir, se encuentra el par de caminos de menor costo que maximiza la disyunción. Esto quiere decir que en el caso de no existir dos caminos totalmente disjuntos encuentran el par de caminos más disjuntos. En este contexto una opción que permite minimizar costos es la búsqueda de caminos parcialmente disjuntos que garanticen la disponibilidad, problema que estudiamos en el Capítulo 3.

2.6.2 Asignación de recursos

Una vez asignado el camino para una demanda es necesario seleccionar los puntos de regeneración, las modulaciones a utilizar y asignar una porción de espectro para cada enlace. Dado que la selección del formato de modulación está directamente relacionada con la distancia de transferencia, la selección de puntos de regeneración afecta fuertemente a este proceso. Cada punto de regeneración divide al camino en dos secciones de transmisión transparente de menor longitud que el camino original. Por lo que el formato de modulación a utilizar en cada subcamino puede diferir y potencialmente tener una mejor eficiencia espectral que el formato de modulación requerido por una transmisión transparente a lo largo del camino completo. A su vez el uso de diferentes formatos de modulación hace que los requerimientos de espectro cambien antes y después de un punto de regeneración.

Simmons propone clasificar las estrategias de asignación de regeneración en tres tipos:

- **Islas de transparencia:** en esta estrategia se divide la topología de la red en subconjuntos de nodos entre los cuales las transmisiones siempre son transparentes. Existen algunos nodo frontera que dividen las islas, estos nodos tienen capacidad de regeneración. Siempre que un camino atravesase un nodo frontera sufrirá regeneración sin importar la distancia total de transparencia. [62].
- **Nodos designados para regeneración:** en esta estrategia unos pocos nodos son elegidos estratégicamente para permitir regeneración. De esta manera si una demanda no puede ser satisfecha por un camino transparente está obligada a pasar por alguno de estos nodos con regeneración. [11, 79, 80].
- **Regeneración selectiva:** esta estrategia permite cierta cantidad de regeneradores en cada nodo y luego se puede seleccionar cualquier nodo intermedio como punto de regeneración. Esto permite en el caso de redes DWDM superar problemas de longitud de transmisión y en redes EON además reducir el uso de espectro [14, 15, 18, 19, 26, 31, 32, 40, 41, 43].

En el caso de las redes DWDM donde el único propósito de utilizar regeneración es el de asegurar que la distancia de transferencia no sea tal que los impedimentos físicos imposibiliten la detección, las dos primeras estrategias son adecuadas. En estas redes, la estrategia de puntos de regeneración es especialmente adecuada ya que es posible seleccionar inteligentemente los nodos aptos de regeneración para asegurar que cualquier demanda pueda ser cursada a un costo mínimo en número de regeneradores. En este tipo de redes la regeneración o tiene ningún impacto en la eficiencia espectral. Sin embargo, en las redes EON como se explicó anteriormente, el uso de regeneradores puede ayudar a reducir los requerimientos de espectro. Es por esto que para el caso de redes EON un esquema de regeneración selectiva puede generar grandes beneficios cuando se utilizan BVTs y/o SBVTs. En los Capítulos 4 y 5 estudiamos en detalle esta estrategia.

Una vez seleccionados los puntos de regeneración es necesario seleccionar el formato de modulación a utilizar. El factor fundamental que rige esta selección es la distancia de transferencia. Por lo tanto, para cada subcamino transparente es necesario seleccionar el formato de modulación de mayor orden posible dada su distancia de transferencia. Para ello es posible valerse de tablas o de modelos matemáticos como el modelo GN [57]. Finalmente, con el formato de modulación se puede calcular el número de *slots* de espectro necesarios.

Finalmente, es necesario asignar *slots* de espectro a lo largo de cada enlace teniendo en cuenta las siguientes restricciones para cada subcamino transparente:

- Restricción de continuidad: a lo largo de un camino transparente los *slots* de espectro asignados para una señal deben ser los mismos para cada enlace que componga el camino (no hay conversión de longitud de onda en los nodos).
- Restricción de contigüidad: los *slots* de espectro asignados a una señal sobre un camino transparente deben ser consecutivos.

Chatterjee en [13] clasifica las estrategias de asignación de espectro entre las siguientes categorías:

- First-Fit: primera porción disponible, esta estrategia busca utilizar siempre el primer conjunto de *slots* disponibles a lo largo del camino. Por ejemplo si el requerimiento de *slots* es 4, esta estrategia asignará los primeros 4 *slots* vacíos que encuentre.
- Random-Fit: asignación aleatoria, esta estrategia selecciona aleatoriamente un conjunto de *slots* contiguos del conjunto de *slots* disponibles.
- First-Last-Fit: primera-última opción, esta estrategia divide el espectro en porciones y en las porciones con índice impar intenta asignar los *slots* de menor orden y en las porciones con índice par intenta asignar los *slots* de mayor orden.
- Last-Fit: última opción disponible, esta estrategia crea una lista de porciones e intenta reutilizar la última opción liberada.

- Least-Used: menos utilizada, esta estrategia favorece el uso de las porciones de espectro menos utilizadas en la red.
- Most-used: más utilizada, esta estrategia favorece el uso de las porciones de espectro que ya se encuentran en uso en alguna parte de la red.
- Exact-Fit, asignación exacta, esta estrategia intenta utilizar la primer porción de espectro libre que coincida exactamente con la cantidad de *slots* requeridos.

Todas estas estrategias, excepto la aleatoria, tienden a tener desempeños similares con First-Last-Fit funcionando un poco mejor. Para una comparación de estas estrategias se puede consultar [13]. Sin importar la estrategia de asignación de espectro, ante tráfico dinámico las redes elásticas presentan un problema inexistente en las redes WDM que es el problema de la fragmentación. Este problema surge cuando a raíz del efecto dinámico de las demandas que reservan y liberan porciones de espectro en los enlaces las porciones libres de espectro no son continuas a lo largo de los enlaces. Esto puede llevar a situaciones donde si bien la utilización de espectro es baja no es posible aprovisionar nuevas demandas por no poder satisfacer la restricción de continuidad. En [12] se puede encontrar una revisión de este problema y de las estrategias existentes para lidiar con el mismo.

RUTEO EN BASE A LA DISPONIBILIDAD

3.1 Introducción

La disponibilidad es una medida de la confianza que se puede tener en un sistema. El ruteo en base a la disponibilidad busca asignar rutas a demandas de forma de garantizar cierto grado de disponibilidad. El modo de hacerlo es agregando diversidad y redundancia a nivel de rutas, por ejemplo, utilizar rutas parcial o totalmente disjuntas. Para entender cómo se relaciona la disponibilidad de un servicio y los eventos que pueden interrumpirlo hay que analizar la supervivencia que es la capacidad de un servicio de continuar cursando tráfico ante eventos disruptivos.

3.1.1 Supervivencia

Cada sección de una red óptica puede cursar tráfico de cientos de servicios. Una falla, por pequeña que sea, puede desencadenar una enorme afectación de servicios. Es por esto que la supervivencia ante fallas siempre ha recibido una atención especial en este campo de estudio, en [66] se puede encontrar un resumen extensivo de las estrategias propuestas para brindar supervivencia en redes ópticas. Los cortes de fibra son las fallas más frecuentes y las más difíciles de reparar, es por esto que la gran mayoría de la literatura se centra principalmente en la gestión de este tipo de fallas. Las estrategias existentes que buscan reducir la afectación de servicio ante fallas pueden clasificarse en dos grandes grupos. Aquellas estrategias que trabajan a nivel de enlace y aquellas que trabajan a nivel de camino.

En el primer caso, ante la falla de un enlace de fibra todo el tráfico cursaba por dicho enlace es reencaminado por otros enlaces para alcanzar el nodo destino. Por otra parte, las estrategias a nivel de camino trabajan cada servicio por separado. Cada servicio afectado por la falla es

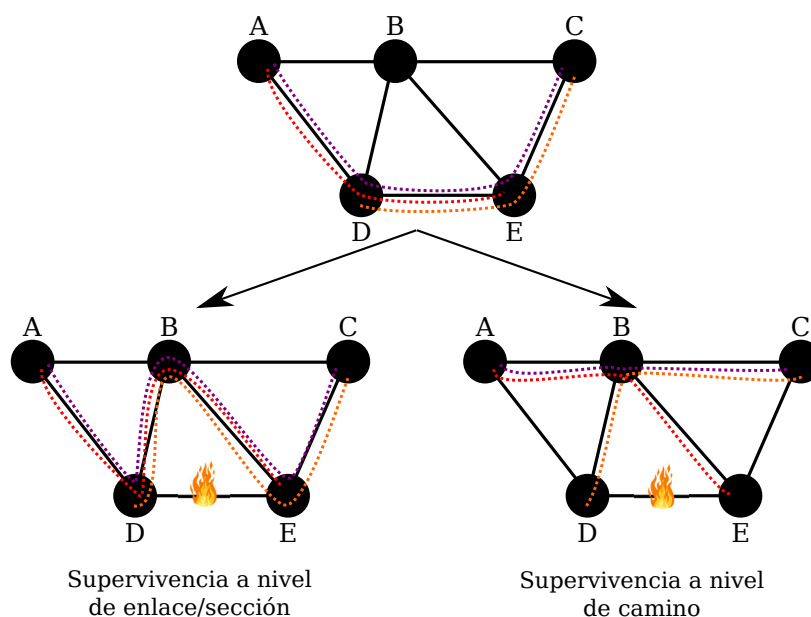


Figura 3.1: Ejemplo de supervivencia a nivel de enlace y supervivencia a nivel de camino.

reencaminado por otro camino que no utilice los recursos afectados. En la Figura 3.1 mostramos un ejemplo de una red de 5 nodos con tres servicios. Los tres servicios utilizan el enlace que va del nodo D al nodo E. Supongamos que dicho enlace falla, si se utiliza una estrategia de supervivencia a nivel de enlace, todo el tráfico que cursaba por el enlace fallado es reencaminado por el enlace D-B y el enlace B-E hasta alcanzar el nodo E. El camino original de los servicios no se modifica con excepción del desvío necesario para alcanzar el nodo E. Por otra parte, si se utiliza una estrategia de supervivencia a nivel de caminos, cada servicio modificará su camino para alcanzar su destino sin utilizar el enlace fallado. La primer estrategia es más adecuada para topologías de tipo anillo en donde la elección de la ruta es trivial. Es por esto que los primeros trabajos en este área utilizaban este tipo de estrategias siendo los anillos la topología predominante en esos años [87]. En los últimos 20 años las redes ópticas han migrado hacia topologías de tipo malla. La evolución de este tipo de estrategias para redes de tipo malla se conoce como supervivencia por ciclos preconfigurados [34], [83]. Las redes de tipo malla proveen un gran conjunto de posibles caminos para cada demanda, por lo que en los últimos años múltiples estrategias de supervivencia a nivel de camino han sido propuestas [54], [65], [73]. Tanto las estrategias a nivel de enlace como las a nivel de camino pueden dividirse en esquemas proactivos (protección) y esquemas reactivos (restauración). En el primer caso se reservan en tiempo de planificación los recursos necesarios para reencaminar el tráfico en caso de falla y en el segundo caso los recursos se buscan una vez ocurrida la falla. Los esquemas de protección son más simples y más rápidos pero tienen un costo mayor. Por su parte los esquemas de restauración son más difíciles de analizar y requieren de un mayor procesamiento ante un evento de falla, sin embargo poseen potencialmente mayor capacidad de supervivencia que los esquemas de protección [30].

Con el advenimiento de las redes configuradas por software estos esquemas pueden tomar mayor relevancia [66]. En este capítulo nos enfocamos en estrategias de protección a nivel de camino en redes de tipo malla. En este tipo de estrategias tanto el camino principal como el/los camino/s de protección se determinan al momento del aprovisionamiento. Este proceso de determinación de caminos se conoce como ruteo. A lo largo de este capítulo desarrollaremos una estrategia de ruteo para caminos parcialmente/totalmente disjuntos basada en la enumeración de escenarios de falla. Los caminos parcialmente disjuntos tienen la virtud de proveer ciertos niveles de supervivencia a un costo mínimo.

3.1.2 Disponibilidad

Cualquiera sea la estrategia que se utilice es de interés poder medir la capacidad de supervivencia y/o la confianza que se puede tener en un servicio específico. A lo largo de los años se han utilizado dos métricas principales para medir la capacidad de supervivencia de un servicio, la restaurabilidad y disponibilidad. La primera se mide sobre una base de fallas predeterminada, por ejemplo el conjunto de todos los cortes simples de fibra, y es una fracción de fallas que pueden sobrevivir sobre el total de fallas en dicha base, ver [17]. Por ejemplo, para un servicio que tiene un camino principal y un camino de protección totalmente disjunto (no comparte ningún enlace de fibra) entonces se puede decir que la restaurabilidad ante cortes simples de dicho servicio será de 1. Esto equivale a decir que no existe ningún corte de fibra simple que afecte a ambos caminos a la vez, por lo tanto el servicio puede seguir funcionando a pesar de cualquier corte de fibra simple. Si la base de fallas cambia la restaurabilidad cambia, por ejemplo si tomáramos todos los cortes simples de fibra más todos los cortes dobles de fibra, ahora existirán algunos cortes dobles que afecten a ambos caminos y, por lo tanto, la restaurabilidad ante cortes simples y dobles será menor a 1.

Por otra parte se utiliza la disponibilidad, que es un enfoque probabilístico. La disponibilidad es la probabilidad de que un servicio siga siendo operativo cuando sea necesario [68]. Puede pensarse como la probabilidad de que al observar el servicio en un instante cualquiera de tiempo este se encuentre en funcionamiento. Mientras más cercana a 1 es la disponibilidad mayor es la confianza que se puede tener en el servicio. La disponibilidad se define para sistemas/servicios que tienen dos estados (funcionando/fallado) con reparación. Esto quiere decir que se asume que siempre que ocurra una falla, el sistema/servicio será reparado y que retorna a su estado anterior sin deterioro. En este contexto, dos de los factores fundamentales que afectan a la disponibilidad de un servicio son el tiempo que transcurre entre fallas y el tiempo de reparación. Mientras más grande sea la relación entre el tiempo entre fallas y el tiempo de reparación mayor será la disponibilidad.

Existen dos estrategias posibles para garantizar una alta disponibilidad de los servicios. La primera consiste en garantizar una alta disponibilidad de los recursos que el servicio utiliza y la segunda consiste en agregar redundancia para minimizar la afectación de servicio ante eventos

de falla.

El primer enfoque implica disminuir al mínimo la probabilidad de ocurrencia de las fallas y minimizar el tiempo de reparación. Ambos factores pueden ser reducidos hasta cierto límite por lo que el efecto que se puede obtener utilizando esta estrategia tiene un alcance también limitado. Si tomamos como ejemplo las redes ópticas en donde una de las fallas más importantes son los cortes de fibra, utilizar esta estrategia equivale a minimizar la probabilidad de que una fibra se corte y de minimizar el tiempo de reparación. Sin embargo, en la probabilidad de ocurrencia del corte intervienen factores que quedan por fuera del control de un proveedor de servicios como pueden ser la ocurrencia de desastres naturales, o fallas humanas propias y de terceros. Por otra parte, el tiempo de reparación puede reducirse únicamente hasta cierto punto ya que dentro de este tiempo se incluyen el tiempo de detección y ubicación de la falla, el tiempo de traslado de la cuadrilla hasta el sitio de la falla y el tiempo propio de la reparación entre otros. Es por esto que, si bien tomar medidas para mejorar la disponibilidad de los recursos es importante, es absolutamente necesario tomar otras medidas para garantizar cierta disponibilidad de los servicios. Una de estas medidas puede ser la utilización de redundancia que para el caso de cortes de fibra equivale a utilizar esquemas de protección/restauración para los servicios y/o enlaces como describimos anteriormente.

La redundancia es utilizada en prácticamente todos los sistemas que necesitan garantizar cierta confiabilidad y/o disponibilidad. El concepto es simple, reservar más recursos de los estrictamente necesarios para proveer un servicio con cierta diversidad lógica/espacial para garantizar la supervivencia ante ciertos eventos de falla. Volviendo sobre el ejemplo de un servicio sobre una red óptica, agregar redundancia puede traducirse por ejemplo en enviar el servicio por dos caminos que utilizan recursos totalmente diferentes. Por lo que si un recurso falla afectará como máximo a uno de los dos caminos mientras que el servicio permanece funcionando. En este ejemplo se puede sobrevivir a cualquier evento de falla única, sin embargo si fallan dos recursos simultáneamente que afectan a los dos caminos el servicio se verá afectado. Si fuera necesario se podría agregar un tercer camino también diverso para garantizar la supervivencia a todos los cortes dobles de fibra. En general el nivel de supervivencia dependerá del nivel de redundancia utilizado.

3.1.3 Ruteo en base a la disponibilidad

El objetivo del ruteo en base a la disponibilidad es encontrar una o más rutas parcialmente o totalmente disjuntas para aprovisionar las demandas garantizando cierto acuerdo de nivel de servicio. El nivel de servicio acordado puede, por lo general, traducirse en una disponibilidad mínima para el servicio. Al aprovisionar las demandas utilizando un único camino, por ejemplo el más corto, cualquier corte simple de fibra a lo largo del camino produce una interrupción en el servicio. Como mencionamos antes, existen dos formas de atacar este problema. La primera es buscar garantizar que la disponibilidad de los enlaces sea lo suficientemente alta como para

que la disponibilidad del camino supere la acordada. Este enfoque implica o bien que los cortes ocurran muy poco o bien que el tiempo de reparación sea muy bajo. En la gran mayoría de los casos estas dos variables son muy difíciles de controlar o de acotar, es por esto que la estrategia más utilizada es la de agregar redundancia, por ejemplo utilizar dos caminos disjuntos para enviar los datos por ambos caminos y así mantener el servicio aun cuando algún enlace se corte. La mayoría de la literatura se ha centrado en proporcionar la capacidad de supervivencia para cortes simples [47] o cortes dobles de fibra [46]. Este enfoque se basa en brindar supervivencia a un conjunto de escenarios sin importar la probabilidad de ocurrencia. Esto implica asumir que cualquier escenario de falla dentro del conjunto considerado tiene el mismo peso o importancia. En este contexto, la disponibilidad es considerada únicamente como una métrica que se utiliza a posteriori del aprovisionamiento con el objetivo de cuantificar la confianza en los servicios servidos por una red.

Un acuerdo de nivel de servicio (SLA) define las garantías de rendimiento que un proveedor de servicios de red le brinda a sus clientes. Por lo general, incluye requisitos mínimos de desempeño del servicio y la multa a pagar por el proveedor en caso de violación del acuerdo. Estos requisitos se asignan comúnmente en función de la disponibilidad del servicio (por ejemplo, 0.999, 0.9999, 0.99999). Que puede ser traducido a minutos de no disponibilidad al año o equivalente dependiendo del periodo de contratación.

Por otra parte, la disponibilidad también puede ser utilizada como un a métrica de los recursos de red a la hora de encontrar un a ruta. Esto se conoce como ruteo en base a la disponibilidad. En [33] se estudió el problema de ruteo de alta disponibilidad en redes basadas en anillos utilizando una aproximación basada en la alta disponibilidad del enlace. En ese trabajo se consideró únicamente la aplicación para anillos siendo en ese tiempo la topología predominante. Sin embargo, se establecen en ese trabajo claramente algunos principios que han sido aplicados en todos los trabajos posteriores:

- Se supone un modelo simple de dos estados (funcionando/fallado) para todos los elementos.
- Los elementos fallan de forma independiente (admitiendo algunos casos de falla conjunta que deben ser considerados particularmente).
- Los tiempos de funcionamiento y de reparación son procesos independientes sin memoria con una media constante.
- La tasa de reparación es mucho mayor a la tasa de fallas.

Estas asunciones permiten utilizar un enfoque clásico de redes redundantes como el expuesto en el trabajo de Fred Moskowitz [52], que será explicado en detalle en la siguiente sección. En [17], se analiza la disponibilidad que pueden proveer las redes de tipo malla diseñadas para sobrevivir a todo corte simple utilizando un esquema de protección a nivel de enlace. En este caso el objetivo es analizar el impacto de los cortes dobles de fibra en redes capaces de soportar

cortes simples. El aporte fundamental de este trabajo es el estudio de la probabilidad de que dos protecciones se superpongan dado que las fallas ocurran simultáneamente. Probabilidad que con un buen diseño puede ser minimizada permitiendo que una red diseñada para sobrevivir a todos los cortes simples presente buen desempeño ante cortes dobles. Sin embargo, en este trabajo no se consideran fallas de más de dos enlaces simultáneos ni se utiliza la disponibilidad como factor determinante en la planificación.

Los autores en [84] propusieron un modelo matemático y estudiaron el problema de aprovisionamiento consciente de la disponibilidad sin protección, con protección dedicada y con protección compartida. Estos utilizan un enfoque clásico para el cálculo de la disponibilidad de servicio aplicando logaritmo para convertir la disponibilidad en un a métrica aditiva. El aporte fundamental de este trabajo es el estudio de la contención en los esquemas de protección compartida. Donde ante un corte doble dos servicios pueden requerir utilizar los mismos recursos quedando uno de los dos servicios sin servir. Proponen un esquema de planificación de protección compartida donde dos servicios pueden compartir recursos de protección únicamente en los casos donde el acuerdo de servicio pueda ser alcanzado.

En [10], se propuso una estrategia de aprovisionamiento con disponibilidad dinámica garantizada utilizando el cómputo de disponibilidad clásico con rutas completamente disjuntas. Los autores en [78] introdujeron el concepto de riesgo de violación de SLA, que es la probabilidad de violar el acuerdo durante un período de tiempo específico. Este trabajo es de especial importancia para la aplicación práctica de esquemas de ruteo en base a la disponibilidad, ya que muestra que para satisfacer la disponibilidad acordada en un acuerdo en un periodo de tiempo acotado es necesario garantizar disponibilidad de servicio mucho mayores. Este enfoque fue investigado con mayor detalle en [21] y [85].

En este capítulo, desarrollamos un nuevo enfoque para calcular la disponibilidad del servicio basado en la enumeración de escenarios con múltiples fallas de enlace. El enfoque es evaluado para el problema de ruteo de demandas de servicio con requerimientos de mínima disponibilidad. La principal contribución de este método es que es general y adecuado para cualquier estrategia de supervivencia basada en principios de protección y/o restauración. Si bien algunos trabajos han utilizado enfoques de enumeración de escenarios [45–47], hasta donde sabemos no han sido utilizados bajo una perspectiva de disponibilidad. En esos trabajos, el objetivo es el de sobrevivir a los escenarios de fallas de enlace único / dual, independientemente de su probabilidad de ocurrencia. Esto equivale a enfocar toda la atención en garantizar una determinada restaurabilidad. En cambio, en este trabajo, analizamos las fallas de enlaces múltiples y su probabilidad de ocurrencia. Para simplificar, nos referiremos a los escenarios de fallas de múltiples enlaces simplemente como escenarios.

Si bien en esta tesis mostramos resultados únicamente para el caso de ruteo consciente de disponibilidad para rutas parcialmente disjuntas, este método también se puede aplicar a problemas más complejos como asignación de rutas y longitudes de onda, asignación de rutas y

espectro, análisis de disponibilidad de servicios, problemas de aprovisionamiento fuera de línea, etc.

3.1.4 Organización del resto del capítulo

En la Sección 3.2 analizamos en detalle las formas de cálculo de la disponibilidad utilizando el enfoque clásico por componentes y presentamos el enfoque por enumeración de escenarios. Mostramos también un método de disminuir la complejidad del problema en redes de alta disponibilidad. En la Sección 3.3 analizamos el problema del ruteo en base a la disponibilidad y proponemos un modelo de programación lineal y dos heurísticas para resolverlo. Las dos heurísticas se diferencian únicamente en el método de cálculo de la disponibilidad, una utiliza un enfoque clásico y la otra utiliza el enfoque de enumeración de escenarios propuesto. Finalmente, en la Sección 3.3.5 mostramos resultados para el ruteo sobre tres redes diferentes para los métodos propuestos, analizamos el costo asociado a cada estrategia y el tiempo de cómputo.

3.2 Disponibilidad de servicio

Sea $\mathbf{G} = (\mathbf{V}, \mathbf{E})$ el grafo que representa la topología de una red óptica de transporte. Cada elemento $v \in \mathbf{V}$ representa a un nodo (vértice) de red y cada elemento $(v, u) \in \mathbf{E}$ representa un enlace bidireccional (arco) entre los nodos v y u . Sea N el número de nodos en el grafo tal que $N = |\mathbf{V}|$ y M el número de arcos en el grafo, $M = |\mathbf{E}|$. Cada nodo representa un ROADM con capacidades de generación/terminación y conmutación de conexiones ópticas. Cada demanda posee un par origen-destino (s, d) . Las demandas pueden ser aprovisionadas utilizando un único camino (sin protección) o con múltiples caminos parcial o totalmente disjuntos. La disponibilidad del servicio dependerá de la disponibilidad de los arcos y de la redundancia obtenida por los múltiples caminos. Cada enlace puede encontrarse o bien disponible o no disponible. Representaremos estos estados con un código binario, 0 para no disponible y 1 para disponible. Por lo tanto, el sistema posee 2^M estados posibles. A cada estado posible le llamaremos *escenario* para poder diferenciarlos de el estado de los enlaces. Sea \mathbf{S} el conjunto de todos los posibles escenarios y S_i el vector de estado del escenario i , S_{ij} el estado del arco $E_j \in \mathbf{E}$ en el escenario i .

$$(3.1) \quad S_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el arco } E_j \text{ está disponible en el escenario } i \\ 0 & \text{si el arco } E_j \text{ no está disponible en el escenario } i \end{cases} \quad j \in \{1, 2, \dots, M\}.$$

Asumimos que los enlaces pueden ser siempre reparados y que los procesos de falla y reparación son procesos independientes. Los periodos de funcionamiento y de falla responden a procesos sin memoria (e.g., procesos de Poisson). Entonces la disponibilidad de un enlace puede estimarse en función del tiempo medio hasta la falla (MTTF) y tiempo medio de reparación (MTTR). Si el arco $E_j \in \mathbf{E}$, $j \in \{1, 2, \dots, M\}$ posee un tiempo medio hasta la falla $MTTF_j$ y un tiempo medio de reparación $MTTR_j$ entonces su disponibilidad α_j queda definida por la expresión 3.2.

$$(3.2) \quad a_j = \frac{MTTF_j}{MTTF_j + MTTR_j}$$

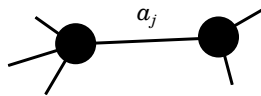


Figura 3.2: Disponibilidad de un enlace.

3.2.1 Enfoque por componentes

El enfoque clásico para el cómputo de la disponibilidad de un aprovisionamiento en particular es en base a los componentes (enlaces) y la redundancia de la opción de ruteo elegida. En esta sección analizamos este enfoque para caminos únicos, total y parcialmente disjuntos. Este enfoque se puede encontrar expuesto con detalle un trabajo de Fred Moskowitz de 1958 [52].

3.2.1.1 Disponibilidad de un camino único

La disponibilidad de un servicio aprovisionado utilizando un único camino depende únicamente de la disponibilidad de los arcos que componen al camino. Sea p el camino en \mathbf{G} y \mathbf{E}_p el conjunto de arcos utilizados por el camino p . El camino sólo estará disponible si todos sus componentes (arcos) están disponibles. Por lo que la disponibilidad del camino A_p se puede expresar como:

$$(3.3) \quad A_p = \prod_{j \in \mathbf{E}_p} a_j$$

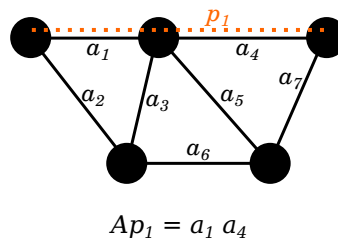


Figura 3.3: Disponibilidad de un camino único.

En la Figura 3.3 se puede ver un ejemplo de la disponibilidad de un único camino p_1 que atraviesa dos arcos con disponibilidades a_1 y a_2 respectivamente. La disponibilidad del camino p_1 depende directamente de la disponibilidad de cada uno de los arcos, por lo tanto $A_{p_1} = a_1 a_2$.

3.2.1.2 Disponibilidad de dos caminos totalmente disjuntos

Un servicio que utiliza K caminos totalmente disjuntos $\{p_k, k = 1, 2, \dots, K\}$, estará disponible si al menos uno de los K caminos está disponible. Por lo tanto, la disponibilidad del conjunto de caminos A_t queda definida como:

$$(3.4) \quad A_t = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - A_{p_k})$$

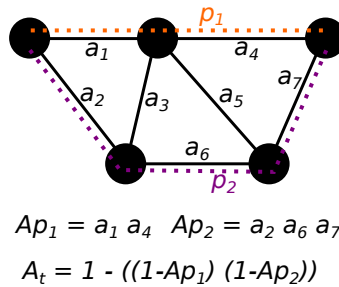


Figura 3.4: Disponibilidad de dos caminos disjuntos.

En la Figura 3.4 se puede ver un ejemplo de la disponibilidad de un servicio comprendido por dos caminos totalmente disjuntos p_1 y p_2 . De la misma forma que en el ejemplo anterior la disponibilidad de cada camino puede calcularse como la productoria de la disponibilidad de los arcos que componen al camino. $A_{p_1} = a_1 a_4$ y $A_{p_2} = a_2 a_6 a_7$. El servicio estará disponible si al menos uno de los dos caminos está disponible, por lo tanto la disponibilidad total del servicio queda expresada como $A_t = 1 - ((1 - A_{p_1})(1 - A_{p_2}))$.

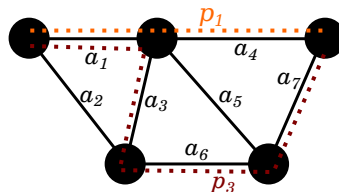
3.2.1.3 Disponibilidad de caminos parcialmente disjuntos

Si una demanda es atendida utilizando múltiples caminos parcialmente disjuntos no es posible calcular la disponibilidad total utilizando la ecuación 3.4. Es necesario utilizar otros métodos de cálculo como la factorización para obtener un valor de la disponibilidad. El método de la factorización es general y permite calcular la disponibilidad para cualquier caso. Sea $H(\mathbf{G}_s, s, d)$ una función que calcula la disponibilidad de un subgrafo \mathbf{G}_s de \mathbf{G} entre los nodos s y d . Que responde a la siguiente definición recursiva:

$$(3.5) \quad H(\mathbf{G}_s, s, d) = \begin{cases} a_j & \text{si } \mathbf{G}_s \text{ es un arco } E_j \text{ desde } s \text{ hasta } d \\ 0 & \text{si } \mathbf{G}_s \text{ no existe camino desde } s \text{ hasta } d \\ a_j H(\mathbf{G}_s |_{\text{contract}(E_j)}, s, d) \\ + (1 - a_j) H(\mathbf{G}_s |_{\text{remove}(E_j)}, s, d) & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Donde $\mathbf{G}_s|_{contract(E_j)}$ es el grafo obtenido a partir de \mathbf{G}_s mediante la contracción de E_j (siempre disponible), y $\mathbf{G}_s|_{remove(E_j)}$ es el grafo obtenido a partir de \mathbf{G}_s removiendo E_j (siempre no disponible).

Luego la disponibilidad del servicio puede calcularse reemplazando \mathbf{G}_s con el grafo inducido a partir de los caminos utilizados para aprovisionar la demanda. El grafo inducido es aquel que incluye todos los nodos y arcos presentes en los caminos.



$$\begin{aligned} H(p_1 \cup p_3, s, d) &= a_1 (1 - (1 - a_4)(1 - a_3 a_6 a_7)) + (1 - a_1) (0) \\ &= a_1 (1 - (1 - a_4)(1 - a_3 a_6 a_7)) \end{aligned}$$

Figura 3.5: Disponibilidad de dos caminos parcialmente disjuntos.

En la Figura 3.5 se muestra un ejemplo de un servicio compuesto por dos caminos parcialmente disjuntos p_1 y p_3 . Para obtener la disponibilidad total del servicio se puede aplicar la factorización. Dado que ambos caminos comparten el primer enlace con una disponibilidad de a_1 se puede obtener A_t como a_1 multiplicado por la disponibilidad de la sección disjunta más $(1 - a_1)$ multiplicado por la disponibilidad de los dos caminos retirando el primer enlace, que es en este caso 0. Por lo tanto, el resultado es $A_t = a_1(1 - (1 - a_4)(1 - a_3 a_6 a_7))$.

3.2.2 Enfoque por enumeración de escenarios

Este enfoque plantea calcular la disponibilidad de un servicio en función de los escenarios que lo afectan directamente en lugar de hacerlo en función de la disponibilidad de sus componentes. En la Figura 3.6 se muestra un ejemplo de un servicio ruteado sobre una topología de 4 nodos y 4 enlaces. El procedimiento consiste en primer lugar, en enumerar todos los posibles estados (escenarios) de la red. Asumiendo que los enlaces son los únicos elementos susceptibles de fallar cada escenario se calcula como una de las posibles combinaciones de falla. Cada escenario puede representarse mediante un vector de estado que indica cuales enlaces están disponibles y cuales no. El primer escenario es aquel en el cual todos los enlaces están disponibles, lo que corresponde a un vector de estado $S_1 = 1111$. Los siguientes escenarios tienen al menos uno de los enlaces no disponibles. Por ejemplo, el escenario 3 tiene el segundo enlace no disponible, lo que corresponde a un vector de estado $S_3 = 1011$. Mediante esta enumeración es posible calcular la probabilidad de que el sistema se encuentre en cada escenario en particular como el producto de la disponibilidad de los enlaces que se encuentran disponibles por la no disponibilidad de los enlaces que se encuentran no disponibles. Estos valores se conocen como probabilidades estacionarias y se

desprenden de la teoría de cadenas de Markov. Por ejemplo, para el escenario 1 la probabilidad estacionaria será $\pi_1 = a_1 a_2 a_3 a_4$.

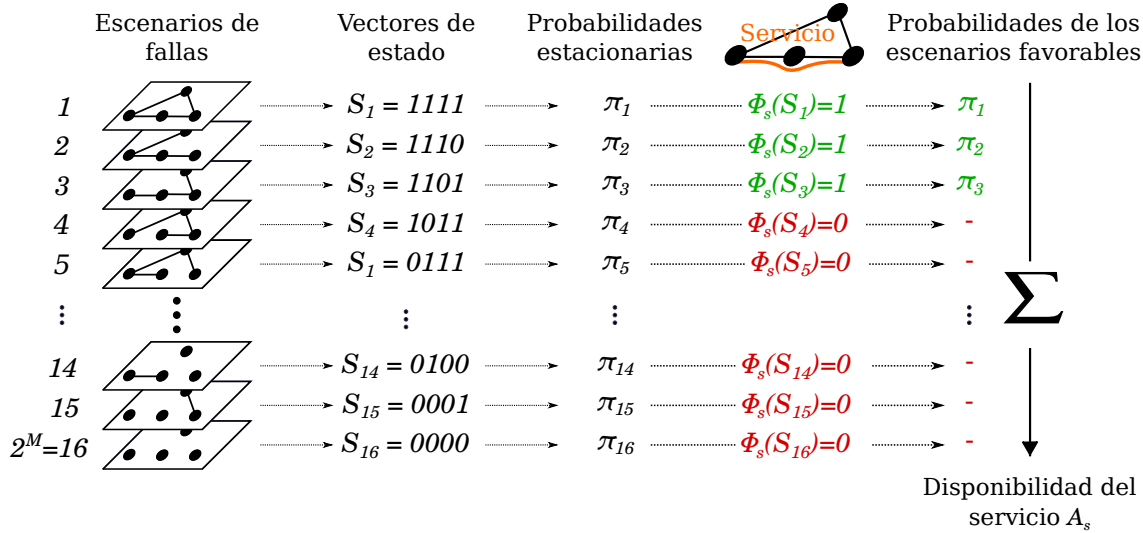


Figura 3.6: Disponibilidad de un servicio.

Es posible obtener a partir de estos escenarios, utilizando la información de la ruta del servicio, un conjunto de escenarios favorables. Los escenarios favorables son aquellos en los cuales el servicio está disponible. Para hacer esto contamos con una función ϕ_s . Una de las ventajas de este enfoque es que esta función es muy fácil de implementar computacionalmente, ya que consiste en una comparación de conjuntos. Por un lado el conjunto de enlaces en estado de falla y por otro el conjunto de enlaces que componen a la ruta del servicio.

Finalmente, una vez obtenidos los escenarios favorables, es posible calcular la disponibilidad del servicio como la suma de las probabilidades estacionarias de los escenarios favorables. Como puede observarse, la complejidad de este enfoque se centra principalmente en la enumeración de los escenarios. La mayor limitación es que el número de escenarios crece exponencialmente con el número de enlaces (2^M). Sin embargo, para redes de alta disponibilidad es posible acotar el número de escenarios ya que la probabilidad estacionaria disminuye rápidamente con el número de enlaces en estado de falla.

En la Figura 3.7 se muestra la probabilidad estacionaria de un escenario en función del número de enlaces en estado de falla para una red de 200 enlaces para tres disponibilidades de enlace $\{0.9995, 0.9999, 0.9999\}$, asumiendo que todos los enlaces tienen la misma disponibilidad. Este tipo de redes se conocen como redes de alta disponibilidad y es el caso de la gran mayoría de las redes ópticas exceptuando tal vez zonas de guerra. Tomemos el caso de una disponibilidad de enlace de 0.9995. El escenario con 0 fallas concentra prácticamente toda la disponibilidad (0,905) mientras que los escenarios con una única falla (200 escenarios) tienen una probabilidad de 0,0004526 cada uno. La probabilidad de los escenarios con 2 fallas tienen una probabilidad cercana

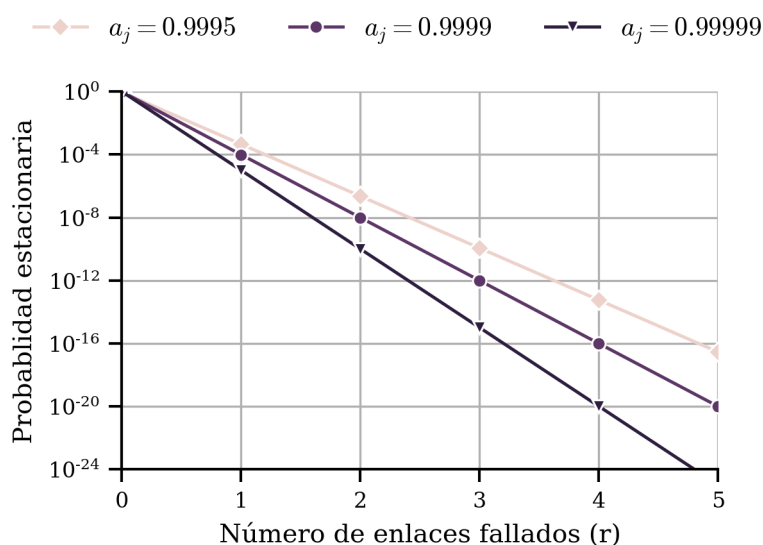


Figura 3.7: Probabilidad estacionaria de un escenario en función del número de enlaces en estado de falla para una red de 200 enlaces.

a los 10^{-7} . La probabilidad estacionaria de un escenario disminuye fuertemente con el número de enlaces en estado de falla. Este efecto se ve potenciado aún más cuando la disponibilidad de los enlaces crece. Por ejemplo, la probabilidad estacionaria de un escenario con tres enlaces fallados disminuye en más de dos órdenes de magnitud si se pasa de una disponibilidad de enlaces de 0.9995 a 0.9999. Es posible utilizar esta característica de las redes de alta disponibilidad para acotar el número de escenarios a enumerar. En la Figura 3.8 retomamos el ejemplo anterior en el cual en lugar de enumerar la totalidad de los escenarios se enumeran únicamente I escenarios. En ese caso aún es posible obtener el conjunto de escenarios favorables y obtener un valor aproximado de la disponibilidad del servicio como la sumatoria de las probabilidades de dichos escenarios. Este valor se encontrará siempre por debajo del valor real ya que es una sumatoria de probabilidades en un subconjunto. Mostraremos en la siguiente sección que el error en el que se incurre al realizar esta aproximación está acotado y que es posible conocer la cota. Esta característica de las redes de alta disponibilidad tiene la potencialidad de reducir fuertemente la complejidad promedio al utilizar este enfoque. Está claro que la complejidad del peor caso sigue siendo exponencial, sin embargo mostraremos en la sección de resultados que para casos prácticos es posible reducir cientos de veces los tiempos de cómputo utilizando esta estrategia.

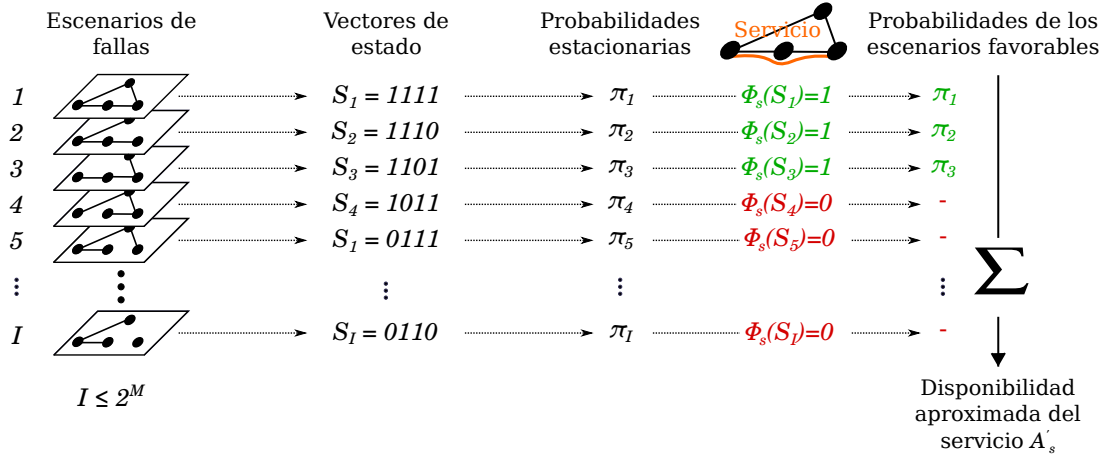


Figura 3.8: Disponibilidad aproximada de un servicio.

Modelado

La disponibilidad de un servicio puede hallarse utilizando cadenas de Markov como en [6, 50], donde cada estado del sistema (escenario) es representado como una palabra binaria S_i de M bits y cada bit S_{ij} representa el estado de un componente (enlace, arco). Asumiendo que cada enlace tiene dos posibles estados, 1 para disponible y 0 para no disponible, existen 2^M posibles escenarios e $i \in \{1, 2, 3, \dots, 2^M\}$. Si todos los procesos de falla y reparación son independientes entre sí, entonces solo pueden existir transiciones simples ya que la probabilidad de que dos eventos ocurran al mismo tiempo es 0. Las tasas de transición pueden aproximarse por $\lambda_j = \frac{1}{MTTF_j}$ y $\mu_j = \frac{1}{MTTR_j}$. Entonces el vector de probabilidad límite de estados π puede encontrarse utilizando álgebra lineal, donde cada elemento π_i es la probabilidad estacionaria del escenario i a la que llamaremos simplemente *probabilidad del escenario*.

$$(3.6) \quad \pi_i = \prod_{j=1}^M (S_{ij}a_j + (1 - S_{ij})(1 - a_j))$$

$$(3.7) \quad \sum_{i=1}^{2^M} \pi_i = 1$$

Es posible relacionar los escenarios con el servicio, para ello suponemos que $\Phi_s : S_i \rightarrow \{0, 1\}$ es la función que asume el valor 1 si el servicio s está disponible en el escenario i y el valor 0 en caso contrario. Diremos entonces que el escenario s es favorable al servicio s siempre que $\Phi_s(S_i) = 1$.

Sea \mathbf{F}_s el conjunto de todos los escenarios favorables al servicio s :

$$(3.8) \quad \mathbf{F}_s = \{i \in \{1, 2, \dots, 2^M\} | \Phi_s(S_i) = 1\}$$

entonces la disponibilidad del servicio s se puede calcular como:

$$(3.9) \quad A_s = \sum_{i \in \mathbf{F}_s} \pi_i$$

Para poder calcular el valor exacto del servicio, todos los escenarios deben ser enumerados. Dado que el número de escenarios crece rápidamente (2^M), en los casos prácticos el número de escenarios debe ser limitado. Supongamos que solo se enumeran un subconjunto \mathbf{S}' de escenarios con, $\mathbf{S}' \subset \mathbf{S}$ entonces el error en el cálculo puede acotarse. Asumamos que \mathbf{S} está ordenado de manera que:

$$(3.10) \quad \pi_i \geq \pi_{i+1} \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, 2^M - 1\}$$

Sea \mathbf{S}' el conjunto de los primeros I escenarios de \mathbf{S} , $0 \leq |\mathbf{S}'| = I \leq 2^M$. Luego de la ecuación 3.7 se obtiene:

$$(3.11) \quad \sum_{i=1}^I \pi_i + \sum_{i=I+1}^{2^M} \pi_i = 1$$

Si solo se consideran los escenarios listados en \mathbf{S}' , entonces el primer término de la ecuación 3.11 es conocido y el segundo es desconocido. Este segundo término corresponde con la probabilidad de que el sistema se encuentre en alguno de los escenarios no incluidos en \mathbf{S}' , denotada por $P(\overline{\mathbf{S}'})$:

$$(3.12) \quad P(\overline{\mathbf{S}'}) = \sum_{i=I+1}^{2^M} \pi_i = 1 - \sum_{i=1}^I \pi_i$$

La disponibilidad del servicio A_s se puede aproximar como la suma de las probabilidades de los escenarios favorables a s que se encuentran en el conjunto \mathbf{S}' . Sea \mathbf{F}'_s el conjunto de los índices de \mathbf{F}_s cuyo vector de estado \mathbf{S}_i está incluido en \mathbf{S}' . Por lo tanto, $\mathbf{F}'_s \subset \mathbf{F}_s$:

$$(3.13) \quad \mathbf{F}_s = \{i \in \{1, 2, \dots, 2^M\} | \Phi_s(\mathbf{S}_i) = 1\}$$

$$(3.14) \quad \mathbf{F}'_s = \{i \in \{1, 2, \dots, 2^M\} | \Phi_s(\mathbf{S}_i) = 1 \wedge \mathbf{S}_i \in \mathbf{S}'\}$$

$$(3.15) \quad A_s = \sum_{i \in \mathbf{F}_s} \pi_i$$

$$(3.16) \quad = \sum_{i \in \mathbf{F}_s} \pi_i \geq \sum_{i \in \mathbf{F}'_s} \pi_i$$

$$(3.17) \quad A_s \geq \sum_{i \in \mathbf{F}'_s} \pi_i = A'_s$$

El error absoluto (e_{abs}) de la disponibilidad aproximada A'_s , es la diferencia entre el valor aproximado y su valor exacto:

$$(3.18) \quad e_{abs} = \sum_{i \in \mathbf{F}_s} \pi_i - \sum_{i \in \mathbf{F}'_s} \pi_i$$

$$(3.19) \quad = \sum_{i \in \mathbf{F}_s} \pi_i - \sum_{i \in \mathbf{F}'_s} \pi_i \leq P(\overline{\mathbf{S}'})$$

Dado que \mathbf{F}'_s es un subconjunto de \mathbf{F}_s el error es la suma de las probabilidades de los escenarios favorables no incluidos en \mathbf{S}' . Por lo tanto, el error está acotado por la suma de las probabilidades de los escenarios no incluidos en \mathbf{S}' , $P(\overline{\mathbf{S}'})$. A'_s es una cota inferior de A_s y si la cota del error es pequeña, entonces A'_s es una buena aproximación de A_s .

3.3 Ruteo en base a la disponibilidad

3.3.1 Definición del problema

Los servicios en las redes ópticas de transporte deben garantizar los requisitos especificados en los acuerdos de nivel de servicio (SLA) para evitar penalizaciones económicas. Dos de las métricas más importantes en estos acuerdos son la disponibilidad del servicio y el tiempo de inactividad máximo por año o por periodo contratado. Ambas métricas se pueden mapear a un objetivo en términos de disponibilidad de servicio. Denotamos esta disponibilidad objetivo como A_{tgt} . Los proveedores de servicios siempre prefieren la solución más económica que garantice la disponibilidad del servicio. El problema de encontrar una o más rutas desde el nodo origen s al nodo destino d y asignar una longitud de onda a cada ruta se conoce como asignación de ruta y longitud de onda. Se puede tratar como un solo problema o se puede resolver en un enfoque de dos pasos: primero el enrutamiento y luego la asignación de longitud de onda. En esta sección sólo se tiene en cuenta el problema del enrutamiento.

El problema de enrutamiento en base a la disponibilidad se puede definir de la siguiente manera: Dada una red y una demanda de servicio desde el nodo s al nodo d , encontrar un par de rutas (total o parcialmente) disjuntas que garanticen la disponibilidad objetivo especificada en el acuerdo de nivel de servicio (SLA) y que minimice una métrica de costo (aditivo, por enlace utilizado). Suponemos que las rutas parcialmente disjuntas solo asignan recursos una vez en los enlaces que utilizan las dos rutas. Esta suposición refleja las protecciones por división y selección en la capa WDM/DWDM, que requieren la asignación de un recurso de longitud de onda única en enlaces compartidos por las rutas. Esto significa que la solución puede incluir redundancia en alguna parte de la red y ninguna redundancia en otras.

3.3.2 Generación de escenarios

El cálculo de un conjunto \mathbf{S}' y las probabilidades de los escenarios incluidos en el mismo es un problema crítico ya que el número de escenarios impacta directamente en el tiempo de total de

computo y en el límite de error. Menos escenarios significan menos tiempo de cálculo, mientras que más escenarios significan mejores cotas de error. Proponemos un método que genera un pequeño conjunto de escenarios que garantiza un límite de error tolerable.

Sea \mathbf{G} sea el grafo que representa la red, a_j la disponibilidad del enlace E_j y A_{tgt} la disponibilidad del servicio requerida, entonces el conjunto de escenarios se computa como se muestra en el Algoritmo 1.

Algoritmo 1: ScenarioSet

Input: $\mathbf{G} = (\mathbf{V}, \mathbf{E}), \{a_j\}, A_{tgt}$
Result: Conjunto de escenarios
 $error \leftarrow 1;$
 $\mathbf{S}' \leftarrow$ empty list;
 $\pi \leftarrow$ empty list;
 $r \leftarrow 0;$
 $i \leftarrow 1;$
while $error > \beta(1 - A_{tgt})$ **and** $r \leq |\mathbf{E}|$ **do**
 for c **from** 1 **to** $\binom{M}{r}$ **do**
 $scenario \leftarrow$ next r-combination of $\mathbf{E};$
 set all S_{ij} to 1;
 set S_{ij} to 0 if E_j is in scenario;
 $prob \leftarrow \prod_{j=1}^M (S_{ij}a_j + (1 - S_{ij})(1 - a_j));$
 add i to \mathbf{S}' ;
 add $prob$ to π ;
 $error \leftarrow error - prob$;
 if $error > \beta(1 - A_{tgt})$ **then**
 break;
 $i \leftarrow i + 1$;
 $r \leftarrow r + 1$;
return $\mathbf{S}', \{S_{ij}\}, \pi$;

Cuando se calcula la siguiente r-combinación de \mathbf{E} , se elige la r-combinación más relevante. Esto se puede hacer fácilmente ordenando \mathbf{E} en función a la disponibilidad del enlace a_j desde la disponibilidad más baja hasta la más alta, y luego siempre comenzando el cálculo de combinaciones desde el primer elemento.

Este método encuentra escenarios y los agrega a \mathbf{S}' hasta que la cota de error disminuya debajo de un valor especificado previamente. Este valor se expresa como una fracción de la disponibilidad objetivo, βA_{tgt} . Siendo β una constante entre cero y uno que permite ajustar el margen de error que se tolera. Un alto valor de disponibilidad objetivo puede requerir más escenarios que un valor de disponibilidad objetivo más bajo.

3.3.3 Formulación de programación lineal entera (*Integer Linear Programming*)

Proponemos una formulación de programación lineal entera (*Integer Linear Programming*) (ILP) basada en el enfoque de enumeración de escenarios. Sea \mathbf{S}' el conjunto de escenarios enumerados. Si $\mathbf{S}' = \mathbf{S}$, se tienen en cuenta todos los escenarios y la solución es óptima. Si $\mathbf{S}' \neq \mathbf{S}$, la solución es aproximada y el error está acotado como se mostró en la sección 3.2.2. Esta formulación encuentra una solución de costo mínimo para aprovisionar un servicio entre los nodos s y d usando como máximo K_{max} rutas. La formulación minimiza el costo total de las rutas; por lo tanto, la solución es el conjunto de rutas parcialmente disjuntas de costo mínimo entre s y d que garantiza la disponibilidad del objetivo.

La solución tiene como máximo K_{max} caminos p_k . Sean x_{uv}^k las variables de flujo de la ruta p_k (ecuación 3.20). La solución puede incluir múltiples rutas que comparten algunos enlaces. Luego, el criterio de optimización es minimizar el costo de todos los enlaces utilizados al menos por una ruta. Las variables de utilización de enlace se muestran en la ecuación 3.21. x_{uv} valdrá 1 si al menos un camino utiliza el enlace (u, v) .

$$(3.20) \quad x_{uv}^k = \begin{cases} 1 & \text{si } p_k \text{ usa el enlace } (u, v) \in \mathbf{E} \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}$$

$$(3.21) \quad x_{uv} = \begin{cases} 1 & \text{si al menos un camino usa el enlace } (u, v) \in \mathbf{E} \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}$$

Para obtener la disponibilidad del servicio, se introducen las variables s_i^k que toman el valor 1 si la ruta p_k se ve afectada en el escenario S_i :

$$(3.22) \quad s_i^k = \begin{cases} 1 & \text{si la ruta } p_k \text{ se ve afectada en el escenario } S_i \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}$$

Un escenario se considera no favorable si todas las rutas se ven afectadas. Las variables s_i representan esta condición:

$$(3.23) \quad s_i = \begin{cases} 1 & \text{si el servicio se ve afectado en el escenario } S_i \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}$$

Formulación

- Minimizar:

$$(3.24) \quad z = \sum_{(u,v) \in E} W_{uv} x_{uv}$$

• Dado:

$$(3.25) \quad \sum_{v|(u,v) \in E} x_{uv}^k - x_{vu}^k = \begin{cases} 1 & \text{if } u = s \\ -1 & \text{if } u = d \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases}$$

$$(3.26) \quad x_{uv}^k + x_{vu}^k \leq x_{uv}$$

$$(3.27) \quad (1 - S_{ij})(x_{uv}^k + x_{vu}^k) \leq s_i^k$$

$$(3.28) \quad 1 + \sum_{k=1}^{K_{max}} (s_i^k - 1) \leq s_i$$

$$(3.29) \quad \sum_{i \in \{1, 2, \dots, |\mathbf{S}'\}} \pi_i (1 - s_i) = a'$$

$$(3.30) \quad a' \geq A_{tgt}$$

$$(3.31) \quad x_{uv}^k, x_{uv}, s_i^k, s_i \in \{0, 1\}$$

$$(3.32) \quad p \geq 0$$

La función objetivo es minimizar el costo total de los enlaces usados, donde W_{uv} es el costo del enlace (u, v) (ecuación 3.24).

K_{max} flujos deben ser satisfechos desde s hasta d . La restricción de continuidad de flujo se representa en la ecuación 3.25. Esta restricción debe cumplirse para todo $u \in \{1, 2, \dots, M\}$ y para todo $k \in \{1, 2, \dots, K_{max}\}$.

La ecuación 3.26 muestra que un enlace (u, v) se considera utilizado si al menos un flujo k lo usa. Esta restricción debe cumplirse para todo $k \in \{1, 2, \dots, K_{max}\}$ y para todo $(u, v) \in \mathbf{E}$.

El escenario S_i afecta el flujo k si el camino p_k usa uno de los enlaces afectados $E_j = (u, v)$ de S_i . Más precisamente, si $S_{ij} = 0$ y x_{uv}^k o x_{vu}^k son 1, entonces el flujo k se ve afectado en el escenario S_i . Esta relación se representa en la ecuación 3.27 y esta restricción debe cumplirse para todo $k \in \{1, 2, \dots, K_{max}\}$ y para todo $i \in \{i \in \{1, 2, \dots, 2^M\} | S_i \in \mathbf{S}'\}$

El escenario S_i se considera no favorable si todos los flujos se ven afectados en ese escenario. Esto se muestra en la ecuación 3.28 y esta restricción debe cumplirse para todo $i \in \{i \in \{1, 2, \dots, 2^M\} | S_i \in \mathbf{S}'\}$.

El valor aproximado (cota inferior) de la disponibilidad del servicio a' es igual a la suma de las probabilidades de todos los escenarios favorables, como se muestra en la ecuación 3.29.

Para garantizar las especificaciones del SLA, el límite inferior de la disponibilidad del servicio debe ser mayor o igual que la disponibilidad objetivo (ecuación 3.30).

3.3.4 Método heurístico

Este método intenta encontrar una solución de ruta única primero. Para hacerlo, verifica si existe una solución de ruta única, ejecutando un algoritmo de ruta más corta utilizando $-\log(a_j)$ como

peso del arco E_j . Si la disponibilidad de la ruta encontrada por el algoritmo de ruta más corta es al menos la disponibilidad objetivo, se activa una búsqueda de ruta única. Por otro lado, si esta disponibilidad no alcanza el objetivo, se desencadena una búsqueda de un par de rutas parcialmente disjuntas. En Algoritmo 2 se encuentra el método al que llamamos enrutamiento consciente de la disponibilidad, AAR por las siglas en inglés (*Availability Aware Routing*).

La búsqueda de una sola ruta se realiza mediante un algoritmo de K caminos más cortos modificado basado en el algoritmo de Yen [82], donde el valor de k no está definido previamente y la primera ruta con suficiente disponibilidad es la mejor ruta. La búsqueda continúa hasta que se encuentra una ruta con suficiente disponibilidad o cuando no se puede encontrar una nueva ruta.

La búsqueda de dos caminos parcialmente disjuntos genera primero un gran conjunto de rutas. Luego se computan todas las 2-combinaciones (pares de caminos) a partir de este conjunto. De todos los pares de rutas que garantizan la disponibilidad objetivo, se elige el que tiene un costo mínimo. El algoritmo utilizado para calcular el conjunto de rutas se muestra en Algoritmo 3.

El cómputo de disponibilidad para rutas únicas se hace multiplicando la disponibilidad de enlaces como en la ecuación 3.3. La disponibilidad del par de rutas se calcula usando factorización como se explica en la sección 3.2.1.1 o usando la suma de probabilidades de escenarios favorables como se muestra en sección 3.2.2. A partir de ahora diferenciaremos estos dos métodos. Llamaremos Heurística de Ruteo Consciente de la disponibilidad con Factorización (AARFH por sus siglas en inglés) a la implementación de la heurística usando la factorización como el método de computación de disponibilidad. Por otro lado, llamaremos Heurística de Ruteo Consciente de la Disponibilidad por Enumeración de Escenarios (AARSEH por sus siglas en inglés) a la implementación que usa la suma de las probabilidades de los escenarios favorables para el cálculo de la disponibilidad.

Algoritmo 2: AAR

Input: $\mathbf{G} = (\mathbf{V}, \mathbf{E}), s, d, \{w_j\}, \{a_j\}$
Result: Conjunto de caminos
for j **from** 1 **to** $M = |\mathbf{E}|$ **do**
 $c_j = -\log(a_j)$;
 $path \leftarrow \text{Dijkstra}(\mathbf{G}, s, d, \{c_j\})$;
 if $path$ **is empty** **then**
 return No path;
 else if $\text{Availability}(path, \{a_j\}) \geq A_{tgt}$ **then**
 $path \leftarrow \text{SinglePathSearch}(\mathbf{G}, s, d, \{w_j\}, \{a_j\})$;
 return $path$;
 else
 $paths \leftarrow \text{PairPathsSearch}(\mathbf{G}, s, d, \{w_j\}, \{a_j\})$;
 return $paths$;

Algoritmo 3: PathsSet

```
Input:  $\mathbf{G}, s, d, \{w_j\}, \{a_j\}$   
 $pathSet \leftarrow$  empty list;  
 $path \leftarrow$  Dijkstra( $\mathbf{G}, s, d, \{w_j\}$ );  
while  $path$  is not empty do  
    add  $path$  to  $pathSet$ ;  
    remove edges in  $path$  from  $\mathbf{G}$ ;  
     $path \leftarrow$  Dijkstra( $\mathbf{G}, s, d, \{w_j\}$ );  
restore all edges in  $\mathbf{G}$ ;  
 $base \leftarrow$  empty list;  
copy all paths in  $pathSet$  to  $base$ ;  
for  $basePath$  in  $base$  do  
    for  $j$  form 1 to length of  $basePath$  do  
         $rootPath \leftarrow basePath.edges(1, j - 1)$ ;  
         $endPath \leftarrow basePath.edges(j + 1, end)$ ;  
         $root \leftarrow basePath.node(j)$ ;  
         $end \leftarrow basePath.node(j + 1)$ ;  
        remove edges in  $basePath$  from  $\mathbf{G}$ ;  
         $midPath \leftarrow$  Dijkstra( $\mathbf{G}, root, end, \{w_j\}$ );  
        while  $midPath$  is not empty do  
             $path \leftarrow rootPath$ ;  
             $path \leftarrow path + midPath$ ;  
             $path \leftarrow path + endPath$ ;  
            add  $path$  to  $pathSet$ ;  
            remove edges in  $midPath$  from  $\mathbf{G}$ ;  
             $midPath \leftarrow$  Dijkstra( $\mathbf{G}, root, end, \{w_j\}$ );  
return  $pathSet$ ;
```

3.3.5 Resultados numéricos

Todos los resultados se obtuvieron utilizando una computadora personal con procesador Intel(R) Core(TM) i7-8700K CPU @ 3.70GHz y 32 Gb de RAM. No se realizó ninguna optimización multiprocesador para los dos métodos heurísticos (implementación de subproceso único). Las instancias de ILP se resolvieron en la misma computadora utilizando IBM CPLEX Solver con un paralelismo máximo de 12.

3.3.5.1 Redes con disponibilidad homogénea

Primero, analizamos el caso homogéneo, donde todos los enlaces en la red tienen la misma disponibilidad α :

$$(3.33) \quad a_j = \alpha \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, M\}$$

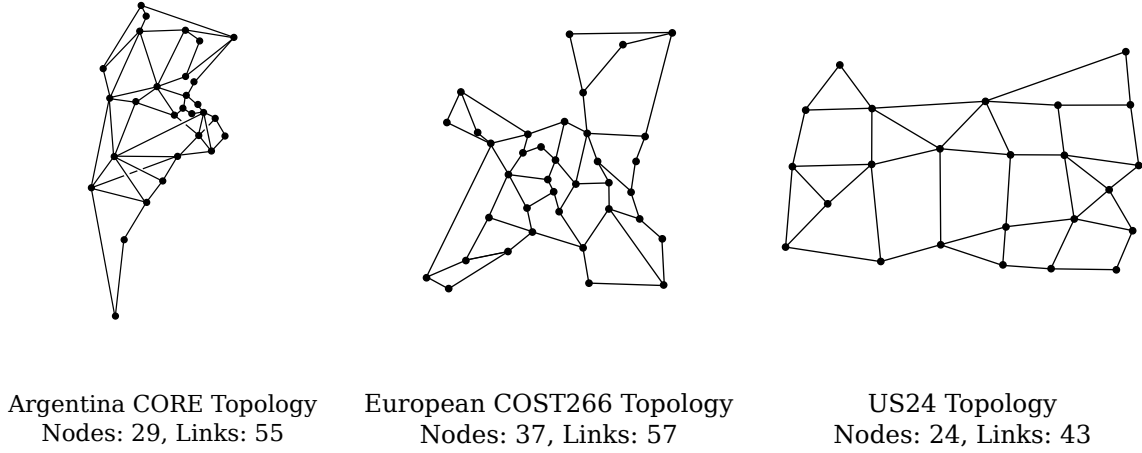


Figura 3.9: Topologías utilizadas para el análisis

entonces la probabilidad de estado estacionario se puede expresar como:

$$(3.34) \quad \pi_i = \alpha^{M-r_i}(1-\alpha)^{r_i}$$

donde r_i es la cantidad de enlaces no disponibles en el estado S_i . Suponiendo que este valor de disponibilidad es alto, $\alpha \rightarrow 1$, entonces π_i depende fuertemente de r_i y M .

En la tabla 3.1 mostramos el valor de π_i para $r_i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$, para una red de 50 enlaces. Como α tiende a 1, la probabilidad estacionaria de un escenario con un alto número de enlaces no disponibles disminuye rápidamente. Por ejemplo, con $\alpha = 0.9999$ escenarios con 3 enlaces no disponibles tienen una probabilidad menor a 1×10^{-12} . Esta es la razón por la que en muchos trabajos anteriores no se tuvieron en cuenta los escenarios [46, 47] con más de 2 enlaces en estado de falla. Sin embargo, para analizar si los escenarios con más de n fallas no deben ser tomados en cuenta, es necesario calcular la probabilidad de que el sistema esté en un escenario con r fallas. Definimos esta probabilidad $P(r)$:

$$(3.35) \quad P(r) = \binom{M}{r} \alpha^{M-r}(1-\alpha)^r$$

En la tabla 3.2 mostramos $P(r)$ para la misma red con $M = 50$ y $\alpha \in \{0.999, 0.9999, 0.99999\}$ y en la tabla 3.3 mostramos $P(r)$ para $r = 3$ con diferentes valores de M . Lo que sigue de estos resultados es que la relevancia de los escenarios depende de la disponibilidad del enlace y del tamaño de la red. Cuantos más enlaces tenga la red, más probable es que se conviertan en escenarios con múltiples fallas. Como consecuencia, los escenarios con más de dos enlaces no disponibles no pueden ser siempre ignorados.

En la Figura 3.10 mostramos el costo medio normalizado de asignar rutas parcialmente/totalmente disjuntas a demandas sobre la topología de red COST266 que se muestra en la Figura 3.9, con disponibilidad homogénea α para $\alpha \in \{0.999, 0.9995, 0.9999, 0.99995, 0.99999\}$.

Tabla 3.1: Probabilidad estacionaria de los escenarios

$\pi_i, M = 50$			
r_i	$\alpha = 0,99999$	$\alpha = 0,9999$	$\alpha = 0,999$
0	0,9995001225	0,9950122304	0,9512056282
1	9,995101E-006	9,951117E-005	9,521578E-004
2	9,995201E-011	9,952113E-009	9,531109E-007
3	9,995301E-016	9,953108E-013	9,540650E-010
4	9,995401E-021	9,954103E-017	9,550200E-013
5	9,995501E-026	9,955099E-021	9,559760E-016

Tabla 3.2: Probabilidad de todos los escenarios con r fallas

$P(r), M = 50$			
r	$\alpha = 0,99999$	$\alpha = 0,9999$	$\alpha = 0,999$
0	0,9995001225	0,9950122304	0,9512056282
1	0,0004997551	0,0049755587	0,0476078893
2	1,22E-007	1,21913E-005	1,16756E-003
3	1,96E-011	1,95081E-008	1,86997E-005
4	2,30E-015	2,29243E-011	2,19941E-007
5	2,12E-019	2,10925E-014	2,02548E-009

Tabla 3.3: Probabilidad de todos los escenarios con $r = 3$ fallas

$P(r), r = 3$			
M	$\alpha = 0,99999$	$\alpha = 0,9999$	$\alpha = 0,999$
10	1.20E-013	1.20E-010	1.19E-007
25	2.30E-012	2.29E-009	0.0002932
50	1,96E-011	1.95E-008	1.87E-005
100	1.62E-010	1.60E-007	0.0001467
200	1.31E-009	1.29E-006	0.0010784
500	2.06E-008	1.97E-005	0.0125949

Utilizamos un factor de error $\beta = 0.1$ para la generación de escenarios (sección 3.2.2). Esto significa que el conjunto de escenarios contemplados siempre fue lo suficientemente grande como para garantizar que la cota del error $P(\overline{S})$ sea al menos diez veces más pequeño que $1 - A_{tgt}$.

El problema de enrutamiento se resolvió para el conjunto de demandas que comprende una demanda por cada posible par de nodos diferentes, utilizando la formulación ILP con $K_{max} = 2$ considerando diferentes disponibilidades objetivo (eje horizontal). El costo normalizado (eje

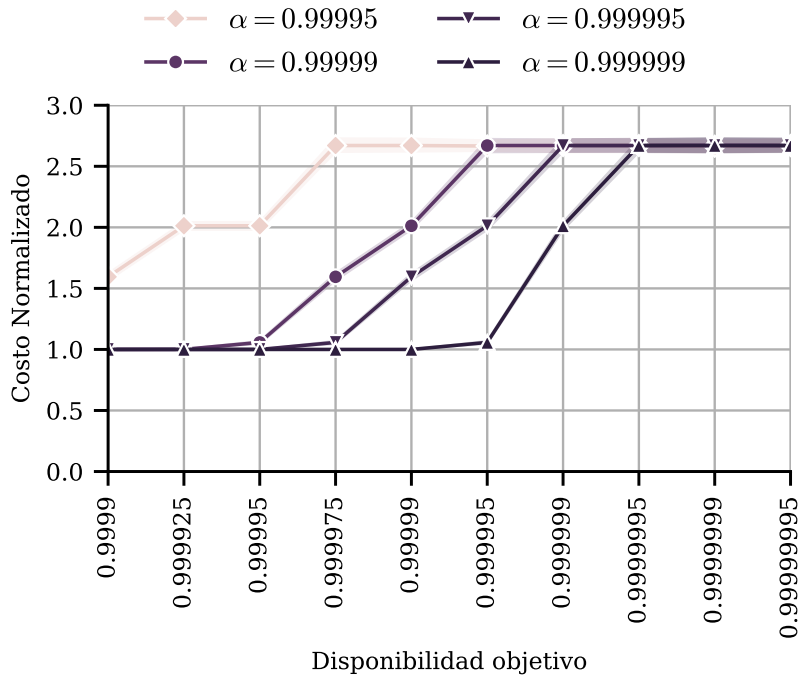


Figura 3.10: Costo normalizado versus disponibilidad objetivo. Topología COST266 con disponibilidad homogénea α , utilizando la formulación ILP

vertical) se calcula como el costo necesario para satisfacer la disponibilidad objetivo dividido por el costo de la ruta más corta, que en nuestro caso es el costo mínimo. Como el costo se estableció en 1 en todos los enlaces, el costo normalizado se puede ver como una métrica de redundancia, que establece la cantidad de enlace adicionales necesarios para lograr la disponibilidad objetivo.

Si la disponibilidad objetivo es mucho menor que la disponibilidad de los enlaces (es decir, $\ll \alpha$), entonces una ruta única puede ser suficiente y el costo normalizado es simplemente igual a 1 (es decir, la ruta más corta). Sin embargo, si la disponibilidad objetivo es mayor que la disponibilidad de los enlaces (es decir, $> \alpha$), entonces puede ser necesario el costo máximo, que está asociado con dos rutas totalmente disjuntas.

Vale la pena observar que algunos servicios pueden requerir una disponibilidad objetivo ligeramente inferior a la disponibilidad del enlace (es decir, $< \alpha$). En estos casos, una sola ruta puede no ser suficiente, mientras que un par de rutas totalmente disjuntas podría exigir más redundancia de la que realmente requiere el servicio, lo que aumenta su costo innecesariamente. Como ejemplo, consideremos un servicio que requiere una disponibilidad objetivo de cinco nueves (0.99999), pero los enlaces tienen una disponibilidad levemente más alta de $\alpha = 0.999995$. En ese caso se puede proporcionar una solución a un costo normalizado de 1,7 utilizando rutas parcialmente disjuntas, en lugar de rutas completamente disjuntas que requieren un costo normalizado superior a 2.5.

3.3.5.2 Redes con disponibilidad heterogénea

En las Figuras 3.11 comparamos los métodos descritos en la sección 3.3 para la topología de red COST266 que se muestra en la Figura 3.9 con disponibilidad aleatoria en los enlaces. Las disponibilidades de los enlaces se seleccionan aleatoriamente de manera uniforme del conjunto {0.9999,0.99995,0.99999,0.999999}. Se utilizaron 5 semillas diferentes para la generación aleatoria de las disponibilidades de enlace. El caso heterogéneo en términos de disponibilidad es más representativo de las redes reales donde la disponibilidad de los enlaces depende de varios factores, como la ubicación geográfica del enlace (es decir, urbano, rural) y su longitud. Se utilizó el mismo conjunto de demandas (una demanda por cada par de nodos). Los resultados que se muestran son, por lo tanto, la media entre todas las demandas y todas las semillas. Se muestra a su vez el intervalo de confianza como una sombra alrededor de los puntos. En algunos casos el intervalo de confianza es tan chico que no se alcanza a apreciar en las figuras.

Se muestran resultados para la solución ILP y para los dos esquemas heurísticos AARFH y AARSEH. Como en los resultados anteriores, el factor de error β se establece en 0.1. El enfoque ILP proporciona los mejores resultados en términos de redundancia pero sus tiempos de cálculo son siempre mayores que los otros métodos. Como los otros dos métodos usan las mismas rutas pre-establecidas, ambos obtienen las mismas soluciones (se superponen en la Figura 3.11). La ventaja principal del enfoque por enumeración de escenarios es la ganancia en tiempo de cómputo que se obtiene. La heurística AARSEH logra los mismo resultados en términos de costo que la heurística AARFH pero requiere 100 veces menos tiempo para bajas disponibilidades y menos de

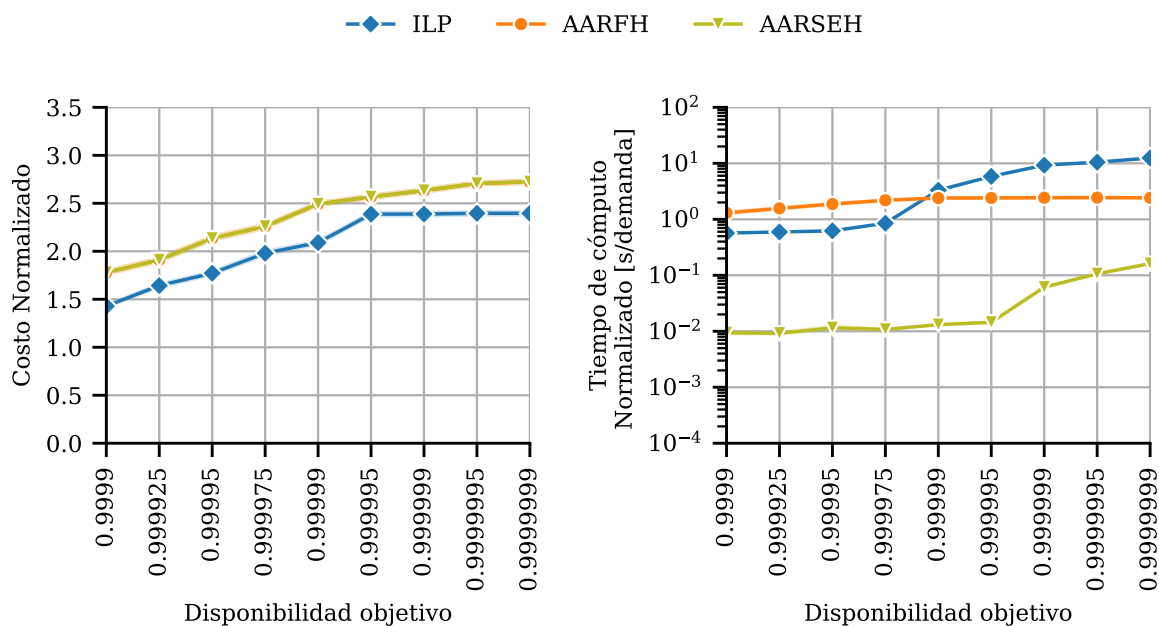


Figura 3.11: Costo normalizado y - Topología europea COST266 con disponibilidad aleatoria.

10 veces menos para altas disponibilidades.

Con respecto al caso de disponibilidad homogénea discutido anteriormente, el caso heterogéneo proporciona una variación mucho más suave del costo normalizado como se ve en la Figura 3.11. Esto significa que se puede proporcionar una amplia gama de disponibilidades objetivo, a costos diferentes. No solo caminos únicos o completamente disjuntos, sino también caminos parcialmente disjuntos que amplían el espacio de disponibilidad que puede admitirse a un costo mínimo.

También es posible analizar estos resultados al revés, lo que significa encontrar la mejor disponibilidad que podemos ofrecer al imponer un costo máximo asequible. Consideremos que podemos permitirnos un aumento de costos de hasta un 100% (2 costo normalizado), luego podemos ver que se puede ofrecer una disponibilidad objetivo de hasta aproximadamente 0,999925 si se usan los métodos heurísticos. Se puede obtener una mejor disponibilidad objetivo con el método ILP, en el orden de al menos 0.999975.

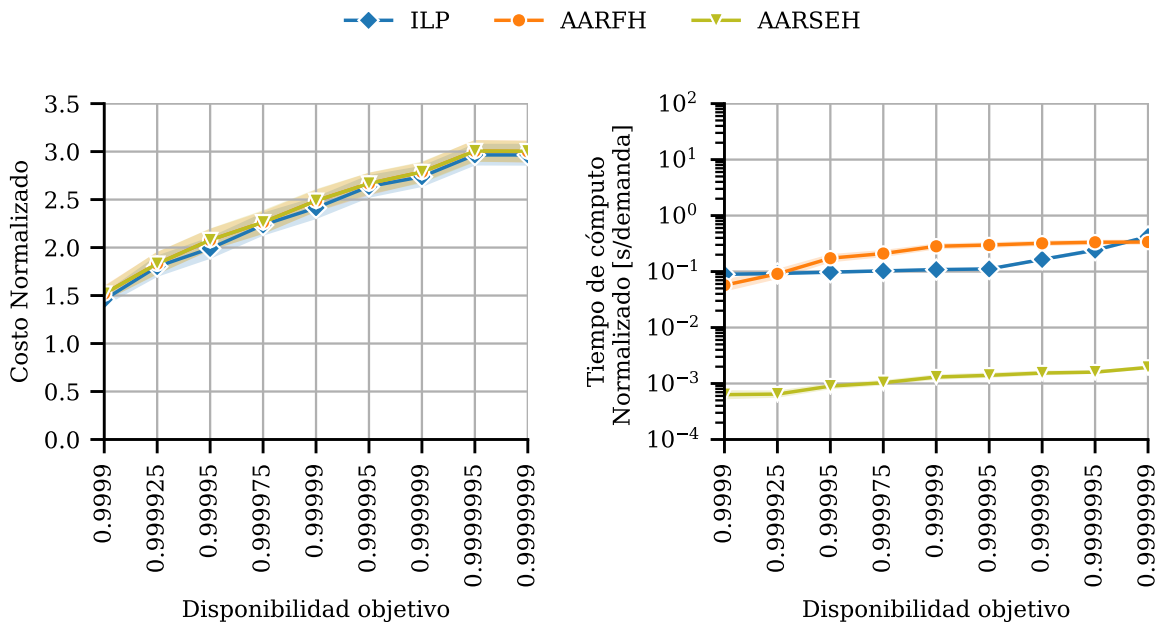


Figura 3.12: Costo normalizado y - Topología estadounidense US24 con disponibilidad aleatoria.

Finalmente, con el objetivo de contrastar los resultados con las otras dos redes de ejemplo, se corrieron los ruteos para las redes US24 y ARG-CORE. Los resultados se pueden ver en las Figuras 3.12 y 3.13. En ambos casos se aprecian resultados similares. El método basado en programación lineal obtiene siempre mejores resultados en términos de costo. Sin embargo, la distancia entre este y los métodos heurísticos es menor para estas dos redes. Obteniendo en el caso de la topología US24 resultados prácticamente superpuestos. En términos de tiempo de cómputo, se puede observar en ambos casos una ganancia similar de la heurística AARSEH con respecto a los otros dos métodos. Mejorando el tiempo de cómputo en algunos casos hasta en 100 veces.

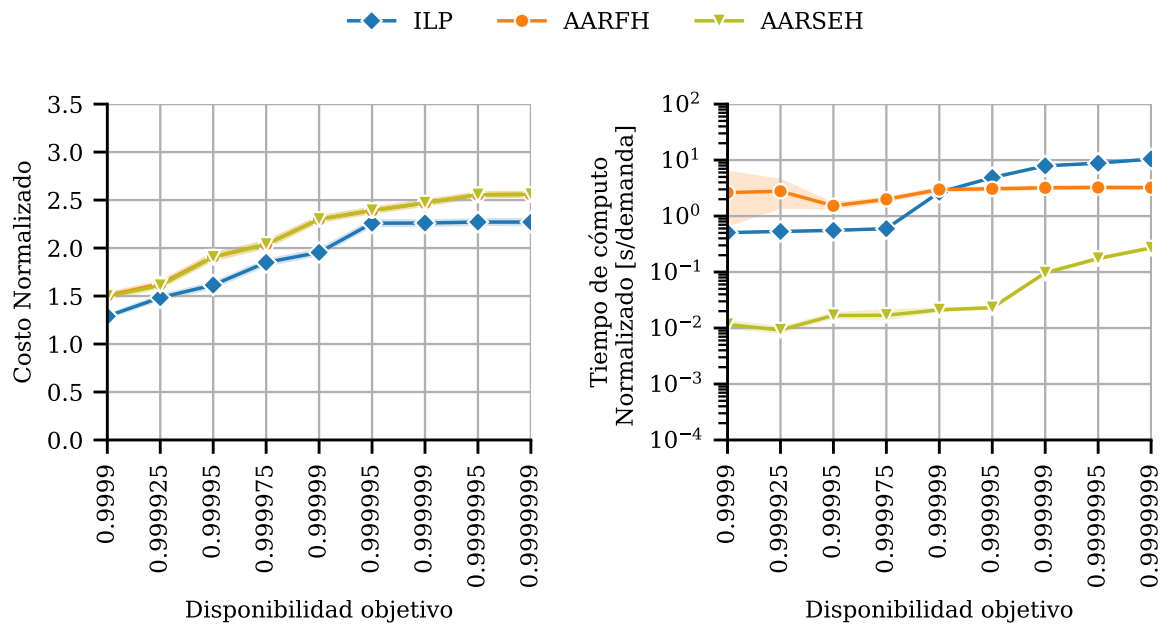


Figura 3.13: Costo normalizado y - Topología Argentina-CORE con disponibilidad aleatoria.

3.4 Conclusiones

En este capítulo propusimos un método de computación de disponibilidad del servicio basado en un enfoque de enumeración de escenarios. Este método permite computar la disponibilidad de servicios a un costo computacional menor en redes de alta disponibilidad. En este tipo de redes es posible calcular el valor de la disponibilidad de un servicio de forma aproximada basado en una enumeración de un conjunto limitado de escenarios. Mostramos que utilizando un conjunto de escenarios específicos, el error está acotado y que la cota se puede determinar con exactitud.

Para mostrar las virtudes del esquema, hicimos uso de este método para el problema de ruteo en base a la disponibilidad. Definimos una formulación de ILP y un método heurístico que utilizan este enfoque. Luego comparamos los resultados con una solución heurística que usa el esquema clásico de factorización como método de cálculo de disponibilidad. En general, los resultados mostraron que las rutas parcialmente disjuntas pueden ofrecer una amplia gama de disponibilidades objetivo para un servicio a un costo mínimo; por lo tanto, se evitan costos adicionales normalmente requeridos por caminos totalmente disjuntos. Además, mostramos que el uso del enfoque de enumeración de escenarios puede disminuir notablemente el tiempo de cálculo con respecto al esquema de factorización, mejorando los tiempos en factores de entre 10 y 100 veces.

Los resultados expuestos en este capítulo fueron presentados en forma parcial en la conferencia internacional “2017 International Conference on Design of Reliable Communication Networks (DRCN 2017)” en Munich Alemania.

ASIGNACIÓN DE RECURSOS

4.1 Introducción

La arquitectura de redes ópticas elásticas (EON) [27, 38], es ampliamente aceptada para la próxima generación de redes de alta velocidad [13]. Las redes EON permiten hacer un uso más eficiente de los recursos del espectro que las redes de WDM y de DWDM tradicionales, que utilizan una grilla fija de 100/50 GHz para el establecer conexiones ópticas. En cambio, las redes EON se basan en una grilla flexible flex-grid [1], donde las conexiones ópticas se aprovisionan usando múltiples porciones de espectro de 12.5 GHz adyacentes (llamaremos a estas porciones también *slots* de forma indiferenciada). La cantidad de *slots* requeridos por una conexión depende de la longitud de la ruta, el formato de modulación elegido, la tasa de símbolos en baudios y el número de portadoras. Los transpondedores de ancho de banda variable (BVT) admiten múltiples tasas de símbolos y múltiples formatos de modulación. Siempre con el objetivo de cumplir con requisitos tales como velocidad, ancho de banda, alcance y tasas de errores (BER). Esta flexibilidad permite a las redes EON soportar conexiones ópticas con anchos de banda “arbitrarios” (en términos de *slots* de espectro) [13, 71].

En las redes WDM tradicionales, la regeneración se utiliza para lidiar con los impedimentos físicos ocasionados principalmente por la distancia de transmisión [67] o para reducir el bloqueo por continuidad de longitud de onda al proporcionar conversión de longitud de onda. Sin embargo, el proceso de regeneración no tiene un impacto en la utilización del espectro, ya que cada conexión óptica utiliza un canal de 50 GHz o 100 GHz, independientemente de la longitud del camino o la longitud de onda asignada. En cambio, en las redes EON, la regeneración se puede usar para comprimir la cantidad de espectro requerido para aprovisionar una demanda. Un regenerador está compuesto por un par de transpondedores de ancho de banda variable en una configuración espalda con espalda [41, 43, 74]. Cuanto menor es la distancia entre los puntos de

regeneración, mayor es el formato de modulación que se puede utilizar, lo que permite aumentar la eficiencia espectral. Los regeneradores flexibles, como los que se usan en las redes EON, pueden modificar el formato de modulación, el número de portadoras y los *slots* de espectro utilizados para una conexión óptica dada. Por lo tanto, el uso de regeneración flexible implica una relación de compromiso entre la utilización del espectro y los costos de regeneración, como se describe en [40, 81].

4.1.1 Aproveccionamiento Transparente/Translucido

Supongamos una red óptica de tipo EON con la topología que se muestra en la Figura 4.1-1. Supongamos también que es necesario aprovisionar una demanda con origen en el nodo A y destino en el nodo G utilizando el camino que se marca en naranja $(AB)(BG)$. Es posible establecer una conexión transparente o una conexión translúcida. Se llama transparente al caso en el cual no se utiliza ningún regenerador en los nodos intermedios. La luz generada en el transpondedor del nodo origen se propaga a lo largo del camino hasta alcanzar el transpondedor del nodo destino completamente en el plano óptico. En el caso translucido se incluye al menos un regenerador en algún nodo intermedio, esto hace que en el regenerador la señal óptica sea transformada a una señal eléctrica que luego se utiliza para modular otra señal óptica que es reingresada a la red. Cada regenerador que se incluye divide la conexión translúcida en dos conexiones transparentes. En el caso del ejemplo existe un único nodo intermedio, por lo tanto existen únicamente dos opciones: o bien se incluye un regenerador en el nodo B o bien se establece la conexión de forma transparente. A continuación mostramos el procedimiento de aprovisionamiento para el caso transparente y el caso translucido. Los detalles sobre el modelo de transmisión utilizado para obtener estos resultados se presentan más adelante en la Sección 4.3.3.

Transparente

En la Figura 4.1 se ilustra el proceso de aprovisionamiento transparente. Dada una demanda desde el nodo A al nodo G de 400 Gb/s y un camino asignado $(AB)(BG)$ se busca asignar una conexión totalmente óptica asignando, modulación, tasa de transferencia, cantidad de portadoras, cantidad de *slots* y *slots* en el espectro de cada enlace. En primer lugar es necesario determinar el formato de modulación a utilizar, como puede verse en la Figura 4.1-2. En las secciones siguientes se desarrolla en detalle el procedimiento de configuración de los transpondedores, pero para el objeto de este ejemplo alcanza con entender que la selección de la modulación depende principalmente de la distancia de transmisión y de la tasa de bits demandada y que este valor puede obtenerse de tablas o utilizando modelos matemáticos. Volviendo al ejemplo, para transmitir los 400 Gb/s (tasa de bits demandada) a lo largo del camino de una longitud de 1350 km el formato de modulación con mayor eficiencia espectral que se puede usar es 16QAM.

Una vez determinado el formato de modulación se puede determinar el número de portadoras y la cantidad de *slots* de frecuencia necesarios para la transmisión. En la Figura 4.1-3 ilustramos

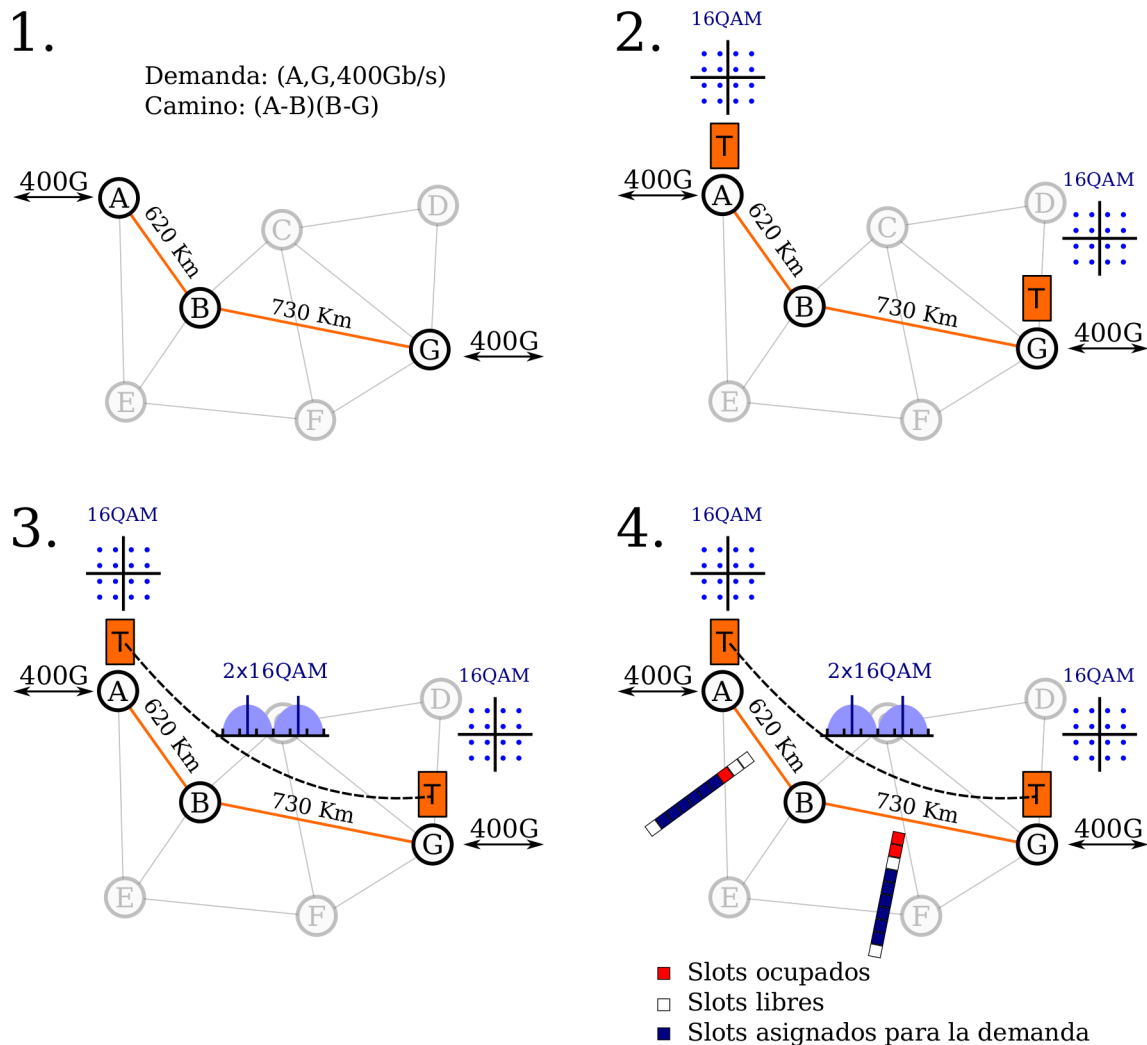


Figura 4.1: Ejemplo de aprovisionamiento Transparente en 4 pasos. 1) Dada una demanda y su camino. 2) Encontrar el formato de modulación de mayor orden en función de la tasa de bits demandada y la longitud del camino. 3) Determinar número de portadoras y cantidad de *slots* y tasa de transferencia de símbolos. 4) Asignar *slots* teniendo en cuenta *slots* ocupados, restricción de continuidad y restricción de contigüidad.

este paso. Suponiendo un transpondedor con una tasa de símbolos máxima de 50 Gbaud, doble polarización y una sobre tasa del 25% para corrección de errores se obtiene que son necesarias 2 portadoras con un ancho de banda de 37.5 Ghz cada una. Esto da un total de 6 *slots* de frecuencia por enlace para la transmisión.

Finalmente, es necesario realizar la asignación de espectro, como se muestra en la Figura 4.1-4. Para ello es necesario encontrar un conjunto de 6 *slots* contiguos que estén libres a lo largo de todo el camino (restricción de continuidad). En el ejemplo se muestran en rojo los *slots* ya utilizados, esto hace que los primeros 6 *slots* contiguos que se encuentran libres en ambos enlaces sean

aquellos que empiezan en el cuarto *slot* contando desde arriba.

El principal costo asociado a este aprovisionamiento es el número total de *slots* de espectro utilizado, que es el recurso principal de la red. En este ejemplo el total de *slots* utilizados por la conexión transparente es 12, 6 *slots* por cada uno de los 2 enlaces utilizados.

Translúcido

Veamos ahora que sucede cuando se incluye regeneración en el ejemplo de la Figura 4.2. Suponemos la misma demanda que en el ejemplo anterior, pero ahora incluiremos un punto de regeneración en el nodo B. En la Figura 4.2-2 se muestra la selección de formato de modulación para el caso translúcido. Al incluir un regenerador en el nodo B lo que se logra es dividir el camino en dos subcaminos. En cada uno de estos subcaminos se establecerá una conexión transparente que en conjunto conforman la conexión translúcida. El regenerador puede ser pensado como un par de transpondedores puestos en una configuración de espalda con espalda. De esta manera todo lo que se recibe por uno es reenviado por el otro y viceversa. Al tener ahora dos conexiones transparentes independientes la selección del formato de modulación se debe realizar para cada una de las conexiones por separado. En este ejemplo en particular el formato de modulación más eficiente que se puede utilizar en el primer tramo es el mismo que en el segundo (32QAM). Esto se da porque las distancias de transmisión son similares, 620 km para el primer tramo y 730 km para el segundo. Lo más importante a destacar en este punto es que el formato de modulación que se puede utilizar en ambos tramos es más eficiente desde el punto de vista del espectro que el formato de modulación requerido por el aprovisionamiento transparente (16QAM).

En la Figura 4.2-3 se ilustra el paso de determinación del número de *slots* por conexión. Ahora, al tener dos conexiones independientes, el proceso debe realizarse para cada conexión por separado. Sin embargo para este ejemplo, como ambas conexiones utilizan el mismo formato de modulación, asumiendo una tasa máxima de símbolos de 50 Gbaud y doble polarización se determina que es necesaria una única portadora por conexión con un ancho de banda de 50 Ghz. Lo que da un total de 4 *slots* por conexión por enlace. Esto representa una compresión del espectro del 33,3%. Esta es una de las principales ventajas del aprovisionamiento translúcido, la incorporación de regeneradores genera una compresión del espectro necesario, mejorando así la utilización del espectro.

Finalmente a la hora de asignar *slots* de espectro a lo largo del camino el aprovisionamiento translúcido también presenta algunas ventajas, ver la Figura 4.2-4. Al tener un regenerador en el nodo B, la restricción de continuidad se ve relajada. Esto es, los *slots* de espectro deben ser los mismos a lo largo de los enlaces de cada conexión transparente pero en el nodo con regeneración los *slots* pueden cambiar. Esto se conoce como conversión de longitud de onda o de espectro. Por otro lado la cantidad de *slots* a asignar es menor debido a la compresión del espectro. En el ejemplo se muestra que en el enlace (AB) se asignan 4 *slots* a partir del cuarto *slot* y en el enlace (BG) se asignan 4 *slots* a partir del tercer *slot*.

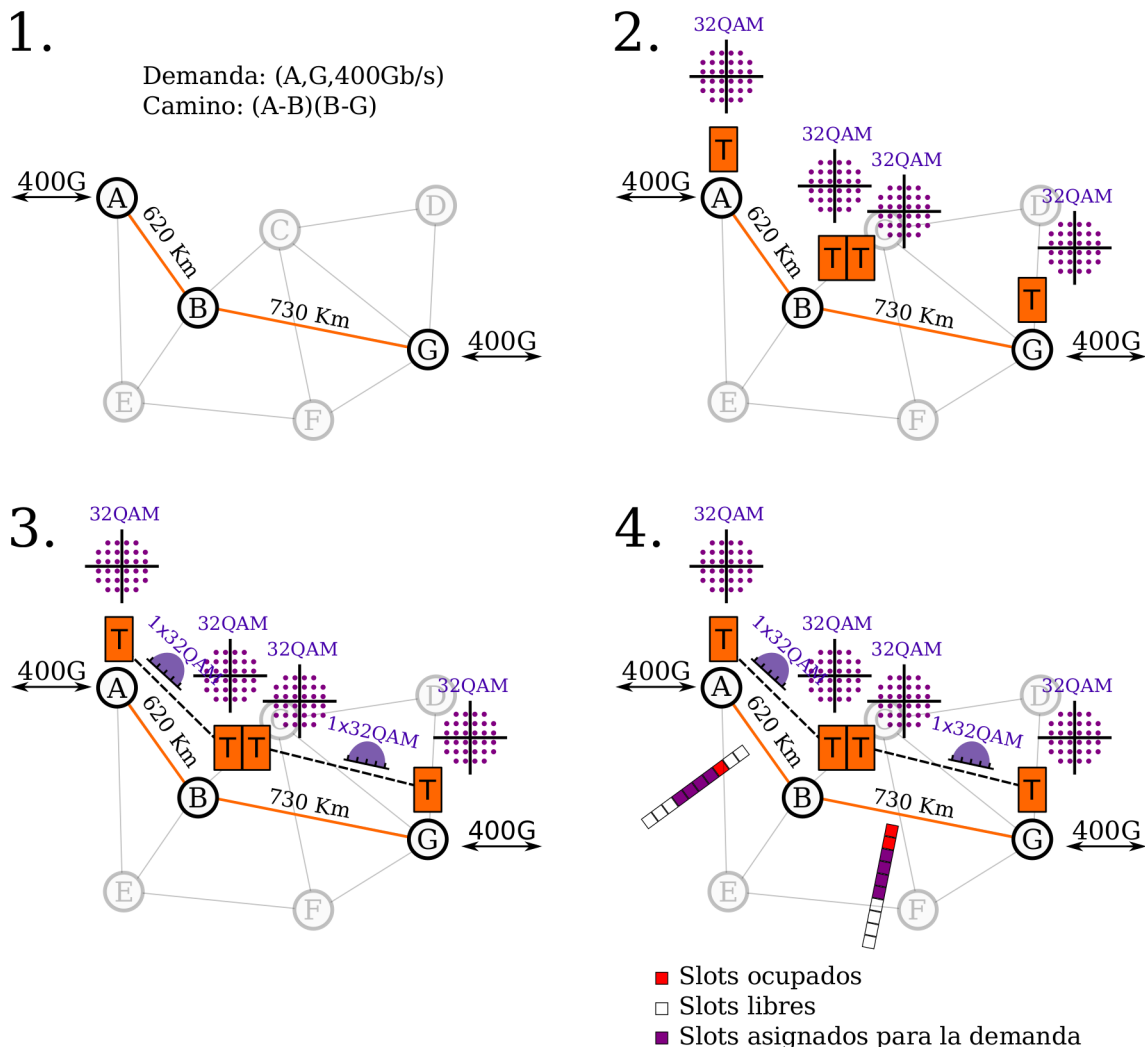


Figura 4.2: Ejemplo de aprovisionamiento Translúcido en 4 pasos. 1) Dada una demanda y su camino. 2) Encontrar el formato de modulación de mayor orden para cada subcamino en función de la tasa de bits demandada y la longitud de cada subcamino. 3) Determinar número de portadoras y cantidad de *slots* y tasa de transferencia de símbolos para cada subcamino. 4) Asignar *slots* teniendo en cuenta *slots* ocupados, restricción de continuidad y restricción de contigüidad.

El costo del aprovisionamiento translúcido ya no puede considerarse únicamente en términos del espectro ya que incluye transpondedores extra para la regeneración. Es por esto que a lo largo del capítulo hablaremos del costo de espectro y del costo de regeneración. Para el caso del ejemplo con el aprovisionamiento translúcido el costo de regeneración es de 1 regenerador y el costo de espectro es de 8 *slots* (4 por enlace). Comparando estos valores con el caso Transparente se puede ver que el costo de espectro se redujo de 12 a 8 *slots* mientras que el costo de regeneración aumentó de 0 a 1. Existe una relación de compromiso entre regeneración y utilización de espectro.

4.1.2 Trabajos relacionados

La regeneración en redes ópticas se ha estudiado ampliamente en términos de colocación de regeneración, donde la regeneración se usa principalmente para compensar los problemas ocasionados por longitud de transmisión o para permitir la conversión de longitud de onda [7, 55]. Este problema también se estudió para redes de tipo EON en [11, 79, 80] centrándose en seleccionar de antemano qué nodos soportan la regeneración para contrarrestar problemas de degradación de señal.

En [81] se estudió el problema del ruteo translúcido consciente de la degradación en redes EON. La regeneración flexible se modeló teniendo en cuenta los diferentes formatos de modulación admitidos por los regeneradores, pero habiendo seleccionado su ubicación antes de comenzar el proceso de aprovisionamiento. Suposición que tiene una penalización en términos de eficiencia espectral. Los resultados mostraron que la regeneración puede mejorar el rendimiento en términos de bloqueo de nuevas demandas. En [40] se estudió por primera vez la relación entre el uso de regeneración y el uso del espectro en redes EON. Se propuso una asignación de espectro fuera de línea y una heurística de colocación de regeneradores. Los resultados mostraron que existe una relación no lineal entre el uso general del espectro y el uso general de la regeneración. Además, los autores mostraron que es posible obtener una reducción considerable del uso del espectro en EON cuando se utiliza regeneración

En [5] se propuso un algoritmo adaptativo de asignación de modulación, de ruta y de espectro para redes EON con regeneración. El problema se dividió en dos: el problema de asignación de ruta, modulación y espectro (RMSA) y el problema de ubicación del regenerador (RP). El problema RMSA se abordó con un algoritmo de ruteo adaptativo que considera la utilización del enlace para el ruteo, una penalización de modulación para la selección de modulación y una penalización del regenerador para la selección de regeneración. Los resultados mostraron que la mejor compensación entre el costo y el rendimiento de bloqueo se obtiene cuando se implementan la modulación adaptativa y la selección de regeneración. En [74] se propuso una formulación programación lineal mixta (*Mixed Integer Linear Programming*) del problema RMSA en redes EON con regeneración. Como en [5, 40, 81], el problema de la colocación del regenerador se modeló como un problema separado. Los resultados mostraron que hay una relación de compromiso entre el número de regeneradores y la utilización del espectro.

En [41], se estudiaron las mejoras de rendimiento obtenidas por regeneración y conversión de modulación en redes EON translúcidas. Los autores propusieron un modelo de regenerador que utiliza transpondedores adicionales para aumentar el número de portadores en secciones transparentes de las conexiones translúcidas. Este modelo de transpondedor, si bien refleja las mejoras en términos de espectro, no refleja adecuadamente las arquitecturas modernas de transpondedor BVT generando una penalización en términos de costo por regeneración. Sin embargo, mostraron que una conexión translúcida con más puntos de regeneración puede usar menos transpondedores que una opción menos regenerada. Esto sucede debido a la compresión

del espectro que pueden obtener los formatos de modulación de alto orden. Se utilizó un enfoque de optimización y los resultados mostraron que se pueden lograr ganancias en términos de tráfico servido al permitir la regeneración con conversión de modulación. Recientemente, se ha estudiado el problema RRMSA para el aprovisionamiento sin protección [14, 15, 18, 19, 26, 31, 43, 70, 72] y para el aprovisionamiento con protección [36].

4.1.3 Nuestra contribución

El aprovisionamiento translúcido en redes EON consiste en seleccionar una opción de regeneración para establecer una conexión translúcida. Este problema puede pensarse de diferentes maneras dependiendo de la arquitectura de los nodos y de la disponibilidad de recursos. Un primer escenario puede ser aquel donde los transpondedores no se encuentran desplegados en los nodos si no que a medida que es requerido los BV-ROADMs se van equipando con determinada cantidad de transpondedores. Estos transpondedores, que pueden ser utilizados para transmisión o para regeneración, pueden pensarse como un costo adicional en el que se incurre con cada nueva demanda que se aprovisiona. Si este es el caso, el espectro es un recurso que se debe asignar de forma racional mientras que la cantidad de transpondedores necesarios para aprovisionar una demanda es un costo y el problema puede pensarse que como un problema de minimización de costo. De forma análoga, podemos pensar en un escenario donde el número de transpondedores disponibles sea muy grande en comparación con la cantidad de demandas a cursar, en un escenario así la mayor limitación vendría dada por la utilización de espectro, y por lo tanto, el problema de aprovisionamiento se reduce a un problema de minimización de uso de espectro. Estas dos situaciones han sido estudiadas en [14, 15, 18, 19, 26, 43, 70, 72] utilizando estrategias que llamamos agnósticas con respecto a los recursos ya que todas las estrategias planteadas en estos trabajos, o bien apuntan a minimizar el uso de transpondedores, o bien a minimizar el uso del espectro.

Es posible, sin embargo, pensar en un escenario más acorde a las dinámica que se espera tener en las redes EON en el futuro donde las demandas tendrán características cambiantes y con tiempos de vida mucho menores a los actuales. Es posible pensar entonces con nodos BV-ROADMs equipados con un conjunto de transpondedores que pueden ser utilizados tanto para transmisión como para regeneración. En un escenario como este, el problema de aprovisionamiento se convierte en un problema de asignación de recursos en dos dimensiones. En este contexto, nuestro trabajo se centró en diseñar algoritmos que llamamos conscientes de los recursos que permiten hacer un uso más racional del espectro y de los transpondedores adaptándose a el estado de la red y a las características de las demandas. En [31] propusimos un primer algoritmo que permite mediante el ajuste de un umbral restringir el campo de soluciones para adaptarse a las necesidades de la red y a la carga, llamamos a este algoritmo asignación de regeneradores basado en umbral de espectro (*Threshold Based Regenerator Assignment*). En segundo lugar, propusimos un algoritmo que permite acotar el campo de soluciones en función de la utilización de transpondedores y espectro,

en función de los requerimientos de las demandas. Llamamos a este algoritmo asignación de regeneradores basado en la utilización (*Utilization Based Regenerator Assignment*). Mostramos finalmente que ambos algoritmos permiten superar a el resto de las estrategias existentes en términos de bloqueo de nuevas demandas, y con la ventaja extra de dar mayor justicia entre demandas de diferentes tipos (*bitrate* , distancia).

4.1.4 Organización del resto del capítulo

En la Sección 4.2 analizamos en detalle el problema de aprovisionamiento de ruta óptimo. Este problema consiste en, dada una ruta, seleccionar una opción translúcida óptima. En la Sección 4.3 presentamos un modelo para las redes EON que utilizaremos luego para las estrategias de aprovisionamiento que se presentan en la Sección 4.4. Finalmente, en la Sección 4.5 mostramos los resultados de las simulaciones obtenidas sobre tres topologías de ejemplo utilizando tanto las estrategias propuestas y estrategias clásicas.

4.2 Aprovisionamiento de ruta óptimo

En general, existen múltiples soluciones candidatas para aprovisionar una demanda de tráfico sobre una ruta p . Estas soluciones van desde la transparente (sin regeneración) hasta la opaca (regeneración en cada nodo intermedio), incluyendo también todas las posibles soluciones translúcidas que implementan regeneración en algunos nodos intermedios. Como es de esperarse, algunas de estas soluciones son mejores que otras si las comparamos en términos de espectro y cantidad de regeneradores. Si dos soluciones tienen el mismo costo de espectro pero una de ellas requiere menos regeneración, entonces podemos considerarla mejor. Sin embargo, otras soluciones pueden ser difíciles de comparar para determinar cuál es mejor. Si una solución requiere menos espectro pero más regeneradores que otra, podemos argumentar que no es posible determinar cuál es mejor. De hecho, ambas pueden ser soluciones óptimas, pero una debe ser seleccionada para aprovisionar la demanda sobre la ruta p . Volveremos sobre la discusión de cómo seleccionar la mejor opción en la Sección 4.4.

Veamos ahora cómo se pueden encontrar las soluciones óptimas candidatas y proporcionamos solo una idea inicial sobre los criterios de selección. Sea $R(p)$ el conjunto de todas las posibles soluciones de aprovisionamiento (opciones) r para el camino p , con $r \in R(p)$. Dado que algunas de estas soluciones pueden encontrarse bloqueadas por falta de espectro, por discontinuidad de espectro o por falta de transpondedores definimos a $R'(p)$ como el subconjunto de $R(p)$ de soluciones no bloqueadas. Sea $S(r)$ el número total de *slots* de espectro requeridas para aprovisionar una demanda sobre la ruta p usando la opción $r \in R'(p)$, calculada como la suma de los *slots* requeridos en cada salto. Sea $T(r)$ la cantidad de regeneradores utilizados por la opción de aprovisionamiento r .

4.2.1 Definición del problema

Dado un camino p , encontrar la mejor opción de aprovisionamiento de ruta es un problema de optimización de objetivo múltiple:

$$\begin{aligned} & \min(T(r), S(r)) \\ & \text{con } r \in R'(p) \end{aligned}$$

En este contexto, se puede encontrar un conjunto de Pareto de soluciones óptimas para cada nueva demanda que necesita aprovisionarse. Este conjunto abarca desde soluciones con un bajo costo de regeneración pero con una alta utilización de espectro hasta otras que hacen un uso intensivo de regeneradores pero requieren menos recursos de espectro. Llamaremos $P(p)$ al conjunto de Pareto obtenido a partir de $R'(p)$ en función de $T(r)$ y $S(r)$ para todo r .

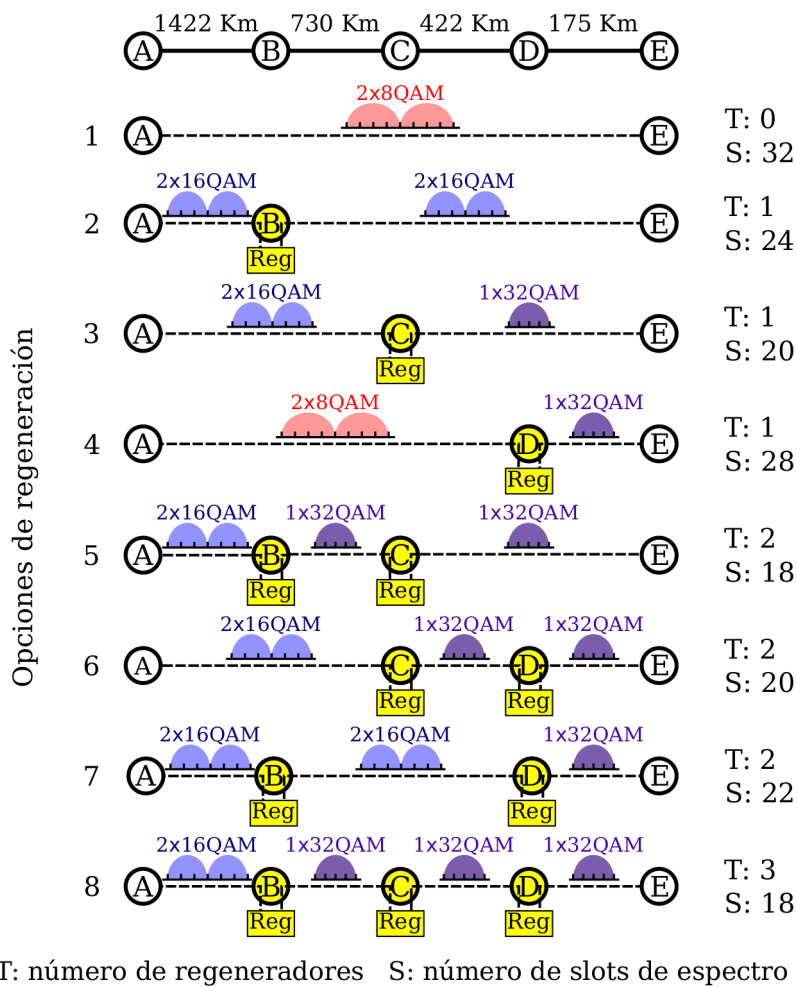


Figura 4.3: Opciones de aprovisionamiento

Para ilustrar este problema, consideramos el ejemplo que se muestra en la Figura 4.3, donde una demanda de 400 Gb/s del nodo A al nodo E necesita aprovisionarse usando una ruta de 5 nodos (A, B, C, D, E) con una longitud total 2750 km, usando un transpondedor BVT de 50 Gbaud, asumiendo una sobretasa de 25% para la corrección de errores (FEC). Los detalles acerca de cómo se obtienen los siguientes resultados se detallan en la Sección 4.3.3. Se analizan todas las opciones de aprovisionamiento: la opción transparente (1), la opción opaca (8) y todas las opciones translúcidas (2 a 7). Los detalles sobre el modelo de transmisión para obtener estos resultados se presentan más adelante en la Sección 4.3.3. La opción transparente (1) requiere 2 portadoras con un formato de modulación de orden bajo (8QAM) para establecer la conexión a lo largo de la longitud total de la ruta. Se requiere un total de $S(r) = 32$ slots: 4 slots por portadora en cada uno de los 4 enlaces. Por el contrario, la solución opaca (8) utiliza formatos de modulación más altos en todos los saltos que requieren cantidades de slots de espectro mucho menores, $S(r) = 18$, a costa de introducir 3 regeneradores, $T(r) = 3$. Las opciones translúcidas (2 a 7) requieren valores intermedios de regeneradores y slots de espectro.

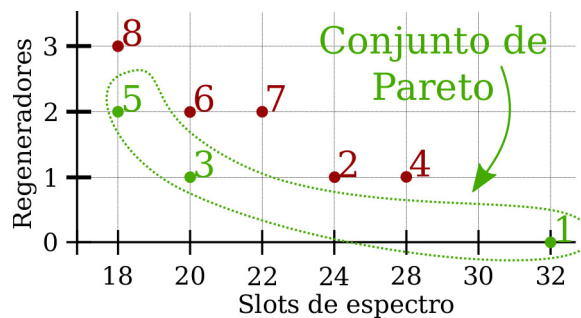


Figura 4.4: Opciones de aprovisionamiento, conjunto de Pareto

En la Figura 4.4, mostramos todas las soluciones en términos de los regeneradores y cantidad de slots de espectro requeridos. Destacamos en verde todas las soluciones que se incluyen en el conjunto de Pareto (frontera de Pareto). Las demás soluciones no son Pareto óptimas porque están dominadas por otras soluciones. Si se prefiere una solución de baja regeneración, entonces la primera opción (transparente) se convierte en la mejor opción, con un requisito de espectro de 32 slots. En cambio, si se busca una solución con bajo uso de espectro, es preferible la quinta opción, ya que utiliza solo 18 slots de espectro y requiere 2 regeneradores. La opción opaca (8) también usa 18 slots de espectro, sin embargo requiere 3 regeneradores, por lo que es dominada por la opción (5). Podemos observar que la tercera opción pertenece también a la frontera de Pareto. Por lo tanto, puede usarse como una opción intermedia que ahorra slots de espectro, $S(r) = 20$ con respecto a la opción transparente agregando una pequeña cantidad de regeneradores, $T(r) = 1$. En este capítulo, analizamos estrategias de aprovisionamiento que seleccionan una solución analizando las opciones del conjunto de Pareto.

El flujo de la estrategia de aprovisionamiento óptimo general se ilustra en la Figura 4.5.

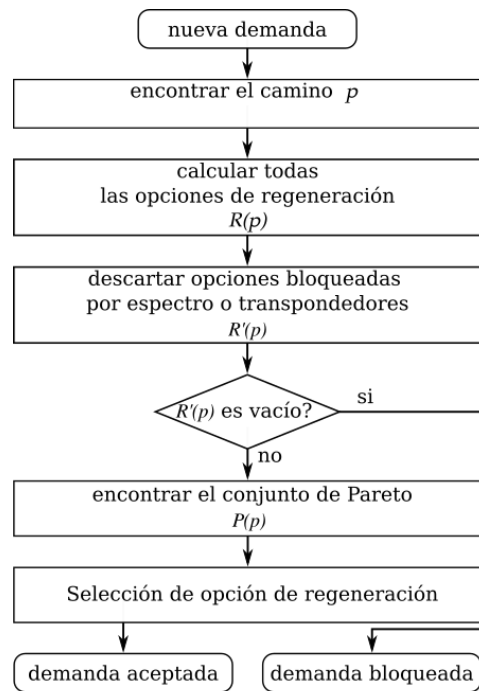


Figura 4.5: Estrategia base de aprovisionamiento

Dada una ruta p , se calculan todas las opciones translúcidas en $R(p)$ y las aquellas que estén bloqueadas se descartan, lo que da como resultado un primer subconjunto $R'(p)$. Si $R'(p)$ no está vacío, entonces el conjunto de Pareto $P(p)$ se obtiene a partir de $R'(p)$ descartando aquellas opciones que no son Pareto óptimas en términos de espectro y uso de regeneración. En general, el conjunto de Pareto está compuesto por múltiples soluciones entre las cuales se debe seleccionar una para aprovisionar la demanda sobre la ruta p .

Es posible plantear diferentes estrategias para el paso de selección de opción de regeneración, proponemos dividir las estrategias en dos categorías. Por un lado, aquellas que persiguen siempre el mismo criterio, que podría ser minimizar el uso de recursos espectrales o en su lugar, el número de regeneradores a lo largo del camino. Nos referiremos a ellas como agnósticas con respecto a los recursos dado que no evalúan la disponibilidad real de los recursos a lo largo del camino y por lo tanto, la solución seleccionada podría contribuir a aumentar la probabilidad de bloqueo. Por otro lado, podemos imaginar estrategias que sean conscientes de los recursos disponibles a lo largo del camino para seleccionar una solución. Afirmamos que estas estrategias pueden reducir la probabilidad de bloqueo ya que tienden a consumir los recursos de la red (espectro y transpondedores) de tal manera que ninguno de estos recursos se convierte en una fuente dominante de bloqueo. En otras palabras, sería inútil ahorrar siempre en recursos del espectro (promoviendo la regeneración) si los transpondedores no están disponibles y, por lo tanto, se convierten en la principal fuente de bloqueo. Tampoco sería práctico ahorrar en regeneración si el espectro se vuelve un recurso escaso o está fragmentado convirtiéndose en la principal causa

de bloqueo. En este contexto, las estrategias de aprovisionamiento conscientes de los recursos tienen un gran potencial para explotar de manera eficiente los recursos de la red, reduciendo la probabilidad de bloqueo y aumentando la capacidad de la red. En la Sección 4.4 proponemos dos estrategias que son conscientes de los recursos.

4.3 Modelo de sistema

Con el fin de determinar el conjunto de todas las posibles soluciones en $R(p)$ para aprovisionar una demanda de tráfico a través de una ruta p , presentamos el modelo de sistema que debemos asumir. En particular, discutimos cómo determinar para cada $r \in R(p)$ el costo asociado en términos de espectro $S(r)$ y de regeneradores $T(r)$. Describimos brevemente el modelo de red general, así como el ROADM y luego proporcionamos un análisis más detallado del modelo de transpondedor que tiene un impacto directo en el costo del espectro $S(r)$.

4.3.1 Modelo de red

Modelamos la red como un grafo $G = (V, E)$ donde V representa el conjunto de nodos ROADM y E el conjunto de enlaces ópticos. Suponemos que cada enlace $e \in E$ tiene 320 *slots* de espectro de 12.5 GHz. Denotamos D el conjunto de demandas de tráfico, cada demanda $k \in D$ se representa como una tripla $k = (o, d, c)$ donde $o, d \in V$ son el nodo origen y destino respectivamente, y c es la tasa de transferencia demandada en *Gb/s*. Las demandas de tráfico k llegan una a la vez y deben aprovisionarse a través de la red si hay suficientes recursos disponibles; de lo contrario, la demanda queda bloqueada.

Para aprovisionar una demanda en una ruta de extremo a extremo $p \subset E$, se debe seleccionar una opción translúcida. Representamos una opción translúcida r como un conjunto de subcaminos de p , $r = \{q_1, q_2, \dots, q_{|r|}\}$, $q_i \subset p$. Todas las opciones translúcidas posibles $R(p)$ incluyen la opción transparente ($|r| = 1$) y la opción opaca ($|r| = |p|$). Si la demanda se aprovisiona sobre una opción transparente r sobre la ruta p , r es un conjunto de solo un subcamino transparente $r = \{q_1\}$, además $q_1 = p$. Entonces, el costo del aprovisionamiento en términos de *slots* de espectro $S(r)$ es igual a la cantidad de *slots* necesarias para la transmisión transparente sobre la ruta p , $S(p)$. Además, este valor es proporcional a la cantidad de *slots* por enlace $F(p)$ requerido para establecer la conexión. Como se utilizan $|p|$ enlaces, el costo total de aprovisionamiento en términos de *slots* está dado por $S(r = \{p\}) = S(p) = |p| \cdot F(p)$ *slots*. No se requieren transpondedores adicionales en los nodos intermedios. En cambio, si la demanda se aprovisiona utilizando una opción translúcida $r = \{q_1, q_2, \dots, q_{|r|}\}$ con $q_i \subseteq p \subseteq E$, se requieren transpondedores adicionales en $|r| - 1$ nodos intermedios para fines de regeneración, $T(r) = |r| - 1$. Además de este costo de regeneración, la ruta translúcida r también requiere $S(q_i)$ *slots* de espectro en cada subcamino, lo que da como resultado un costo total dado por $S(r) = \sum_{i=1}^{|r|} S(q_i)$ *slots*. Como el formato de modulación y el número de portadoras pueden cambiar de un subcamino a otro, la cantidad

de *slots* por enlace $F(q_i)$ puede ser diferente para cada q_i . Entonces $S(q_i)$ es igual al número de saltos de q_i multiplicado por el número de *slots* por enlace requerido en ese subcamino, $S(q_i) = |q_i| \cdot F(q_i)$. En general, dado que se pueden usar formatos de modulación de mayor orden en rutas translúcidos que en rutas transparentes, se requieren menos *slots* de frecuencia a costa de transpondedores adicionales.

La cantidad máxima de soluciones de aprovisionamiento depende de la cantidad de saltos de la ruta p , $|R(p)| = 2^{|p|-2}$, que incluye no solo todas las opciones translúcidas sino también la opción transparente. Cada ruta $r \in R(p)$ se compone de $|r|$ conexiones transparentes que tienen su propio formato de modulación, número de portadoras y *slots* de espectro según el modelo de transpondedor descrito en la Sección 4.3.3. Una ruta transparente r ($|r| = 1$) tiene solo una conexión transparente igual a p .

4.3.2 Modelo de BV-ROADM

Consideramos una red donde cada nodo es un multiplexor con agregación y extracción de señales óptico reconfigurable de ancho de banda variable *Bandwidth Variable Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer* (BV-ROADM). Asumimos también una arquitectura de nodo de conmutación de espectro de grilla flexible como se describe en la Sección 2.5.1, para más detalles de esta arquitectura se puede consultar a [13]. Los BV-ROADM poseen capacidades de conmutación óptico de supercanales con cualquier cantidad de *slots* de espectro de 12.5 GHz y también tienen capacidades de agregación de supercanales. La regeneración flexible se proporciona mediante el uso de pares de transpondedores en una configuración de espalda con espalda. Cada par de transpondedores constituye un *regenerador*. Cada nodo BV-ROADM está equipado con un conjunto de transpondedores que se pueden utilizar para el aprovisionamiento de demandas, ya sea si la demanda tiene como origen o destino el propio nodo o si esta lo utiliza como punto de regeneración. La regeneración se logra utilizando un par de transpondedores en una configuración espalda con espalda.

Podemos analizar dos escenarios que dan cuenta de cómo se considera la regeneración. Un escenario considera la regeneración ilimitada, donde los nodos pueden eventualmente equiparse con la cantidad requerida de nuevos transpondedores. Por lo tanto, en este escenario no existe un límite superior en la cantidad de transpondedores que puede tener un nodo, y el problema se reduce a la minimización del costo de regeneración. En cambio, el otro escenario asume una regeneración limitada donde cada nodo ya está equipado con un número limitado de transpondedores (predesplegados). Si es así, el problema se convierte en un problema de asignación que tiene como objetivo optimizar el uso de estos transpondedores para reducir la probabilidad de bloqueo.

4.3.3 Modelo de transpondedor

Consideramos un modelo de transpondedor elástico BVT que admite una capacidad máxima de C expresada en Gbit/s. El transpondedor modula un conjunto de M portadoras ópticas a una tasa de símbolos de B Gbaud, que incluye una sobrecarga de $H\%$ para la corrección de errores (FEC). Siempre se selecciona el formato de modulación que provea la mayor eficiencia espectral y que permita establecer la conexión dada la distancia requerida. Adoptamos el modelo GN [57], que permite el cálculo de los efectos no lineales de la fibra óptica como una penalización de ruido gaussiano. En el Apéndice A damos más detalles acerca de este modelo y de las simplificaciones que utilizamos para su implementación.

Consideramos seis formatos de modulación: BPSK, QPSK, (8, 16, 32, 64)-QAM con su eficiencia espectral $\eta \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ respectivamente. La tasa de transferencia para cada portadora óptica viene dada por $2 \cdot B \cdot \eta / (1 + H/100)$ al considerar la multiplexación por división de polarización (PDM). La tasa de transferencia C del transpondedor se puede definir como el producto del número de portadoras por la tasa de símbolos por portadora, como se muestra en ecuación 4.1.

$$(4.1) \quad C = \frac{M \cdot 2 \cdot B \cdot \eta}{1 + H/100}$$

Para transportar una demanda $k = (o, d, c)$ la capacidad del transpondedor debe ser de al menos c ; entonces, $C \geq c$. Suponemos que i) el número de operadores M es lo suficientemente grande como para siempre satisfacer la tasa requerida, y ii) los transpondedores admiten velocidad de transmisión variable, con $B \leq B_{max}$ expresado en Gbaud, donde B se configura con la tasa de símbolos mínima requerida para satisfacer la demanda de tráfico ($C = c$) dado un formato de modulación y el número de portadoras requeridos. Con este fin, cada transpondedor, independientemente de que sea utilizado para los extremos de la ruta o como parte de un regenerador, se configura de la siguiente manera:

Dado una distancia objetivo (es decir, la longitud de la conexión transparente), la velocidad en baudios máxima B_{max} y la sobrecarga H :

1. Encontrar la modulación de mayor orden (eficiencia espectral η) soportada por la longitud de la ruta usando el modelo GN [57]. Para más información ver el Apéndice A.
2. Determinar el mínimo número de portadoras necesarias para la tasa c

$$(4.2) \quad M = \left\lceil \frac{c \cdot (1 + H/100)}{2 \cdot B_{max} \cdot \eta} \right\rceil$$

3. Actualizar el valor de la tasa de baudios B necesaria para la tasa c

$$(4.3) \quad B = \frac{c \cdot (1 + H/100)}{2 \cdot M \cdot \eta}$$

4. Calcular el número de *slots* de espectro necesarios con:

$$(4.4) \quad F = M \cdot \left\lceil \frac{B}{12.5GHz} \right\rceil$$

Volviendo al ejemplo de la figura 4.3, donde se necesita aprovisionar una demanda de servicio de 400 Gb/s ($c = 400$ Gb/s), analicemos la opción transparente $r = \{p\}$. En base a la longitud de transmisión transparente de 2750 km, usando el modelo GN [57] encontramos que el formato de modulación de mayor orden que permite establecer la conexión es 8QAM, con una eficiencia espectral de $\eta = 3$. Suponiendo una tasa de símbolos máxima de $B_{max} = 50$ Gbaud y una sobrecarga de FEC de 25% ($H = 25$) podemos determinar la cantidad de portadoras requeridos usando la ecuación 4.2

$$M = \left\lceil \frac{400Gb/s \cdot (1 + 25/100)}{2 \cdot 50Gbaud \cdot 3} \right\rceil = \lceil 1.66 \rceil = 2$$

Una vez encontrado el número de portadoras, es posible calcular la tasa de símbolos requerida usando la ecuación 4.3

$$B = \frac{400Gb/s \cdot (1 + 25/100)}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 41.66GBaud$$

Finalmente, la cantidad de *slots* necesarios por enlace se puede encontrar usando ecuación 4.4

$$F = 2 \cdot \left\lceil \frac{41.66GBaud}{12.5GHz} \right\rceil = 2 \cdot \lceil 3.33 \rceil = 8$$

Se requieren 4 *slots* por portadora dando un total de 8 *slots* por enlace. El número total de *slots* de espectro requeridas por la opción de aprovisionamiento Transparente es la suma de los *slots* de espectro requeridas en cada salto

$$S(r) = \sum_{i=1}^{|r|} S(q_i) = S(p) = 4 \cdot F = 4 \cdot 8 = 32$$

4.4 Selección de la opción de regeneración

En este capítulo consideramos seis estrategias de aprovisionamiento: *Transparente*, *Opaca*, asignación de regeneradores primero el mayor alcance (*First Longest Reach Regenerator Assignment*) (FLR-RA), asignación de regeneradores primero la menor porción de espectro (*First Narrowest Spectrum Regenerator Assignment*) (FNS-RA), asignación de regeneradores basado en umbral de espectro (*Threshold Based Regenerator Assignment*) (TH-RA) y asignación de regeneradores basado en la utilización (*Utilization Based Regenerator Assignment*) (UT-RA). Las dos primeras son estrategias triviales, la estrategia *Transparente* sin regeneración y la *Opaca* con regeneración en cada salto. Primero el alcance más largo (FLR-RA) y primero el espectro

más estrecho (FNS-RA) son dos estrategias heurísticas propuestas por Chaves et al. en [15] [18]. Todas estas estrategias pueden considerarse agnósticas con respecto a los recursos ya que siempre tratan de minimizar, o el espectro, o la cantidad de regeneradores. Por otra parte, proponemos dos estrategias conscientes de los recursos. En primer lugar la estrategia basada en umbral de *slots* de espectro (TH-RA) que propusimos en [31]. Finalmente, un nuevo algoritmo basado en utilización (UT-RA).

4.4.1 Estrategia *Transparente*

Utiliza transpondedores solo para transmisión/recepción, por lo tanto, las señales ópticas deben recorrer toda la longitud del camino sin regeneración. Esta estrategia hace un uso intensivo del espectro con un uso mínimo de transpondedores.

4.4.2 Estrategia *Opaca*

Esta estrategia incluye la regeneración en cada nodo intermedio con transpondedores disponibles. Por lo tanto, una gran proporción de los transpondedores se utilizan para la regeneración. Como los regeneradores se incluyen en los nodos intermedios, las longitudes de transmisión se acortan y, por lo tanto, se pueden usar formatos de modulación de orden superior, lo que resulta en un mejor uso del espectro en comparación con la estrategia *Transparente*. Sin embargo, el uso intensivo de transpondedores puede resultar en una situación de bloqueo temprano debido a la falta de transpondedores.

4.4.3 Estrategia primero el mayor alcance FLR-RA

La estrategia asignación de regeneradores primero el mayor alcance (*First Longest Reach Regenerator Assignment*) (FLR-RA) intenta llegar lo más lejos posible sin regeneración. Esto significa que, dada una ruta, el algoritmo aumenta la longitud de transmisión *Transparente* en un salto por vez hasta que encuentra un bloqueo. En caso de abundancia de recursos esta estrategia asignará la solución *Transparente* en la gran mayoría de los casos. En cambio, en el caso de escasez de recursos, si encuentra un bloqueo asigna un regenerador lo más lejos posible del nodo origen. En última instancia, esta estrategia asigna soluciones cercanas a la *Transparente*, pero con la capacidad adicional de superar algunas situaciones de bloqueo mediante el uso de la regeneración. Para obtener más información sobre este algoritmo referirse a [15] [18].

4.4.4 Estrategia primero la menor porción de espectro FNS-RA

La estrategia asignación de regeneradores primero la menor porción de espectro (*First Narrowest Spectrum Regenerator Assignment*) (FNS-RA) intenta utilizar el espectro más estrecho en la medida de lo posible. Esto significa que, dada una ruta, el algoritmo aumenta la longitud de transmisión *Transparente* en un salto a la vez hasta que ello implique un aumento en la cantidad

de *slots* de espectro por enlace. Cuando esto sucede, se coloca un regenerador en el nodo anterior. De esta manera, el algoritmo asegura un uso de espectro mínimo y, en segundo lugar, minimiza el número de regeneradores. Este algoritmo encuentra soluciones cercanas al caso opaco pero con la capacidad extra de reducir el número de transpondedores necesarios. Para obtener más información sobre este algoritmo referirse a [15] [18].

4.4.5 Estrategia basada en umbral TH-RA

En [31] propusimos el algoritmo asignación de regeneradores basado en umbral de espectro (*Threshold Based Regenerator Assignment*) (TH-RA) que responde al diagrama de flujo mostrado en la Figura 4.5. Dada una ruta, se calculan todas las opciones de regeneración y se descartan las que están bloqueadas. En este paso se incluye un límite al número de nodos que pueden incluir regeneración, para así limitar el número máximo de opciones a evaluar. A los fines prácticos esto permite limitar la complejidad de este algoritmo que de lo contrario es combinatorio con el número de saltos del camino, y por otro lado, permite limitar el costo máximo en términos de transpondedores que puede elevarse demasiado. Por ejemplo, si el límite se asigna en 8 regeneradores esto representa un incremento en el costo de 8 veces (16 transpondedores contra 2) con respecto al aprovisionamiento transparente que es en efecto un incremento excesivo en el costo. Los nodos que admiten regeneración se seleccionan entre aquellos nodos que tienen transpondedores disponibles tratando de maximizar la cantidad de saltos entre los mismos. Llamamos a este límite al tamaño de la base de combinaciones ρ . Luego, el conjunto de Pareto se obtiene descartando aquellas opciones que no son Pareto óptimas. Si no hay ninguna opción disponible, la demanda se bloquea. En esta estrategia, la opción de regeneración se selecciona del conjunto de Pareto dependiendo de un umbral dado en número de *slots*.

En el Algoritmo 4 mostramos en detalle el proceso de selección de opciones. El umbral α funciona como un presupuesto de espectro, el algoritmo intenta seleccionar una opción de aquellas que usan menos *slots* de espectro que α minimizando el número de regeneradores. Si no hay una opción con menos *slots* de espectro que α , se selecciona la opción que minimiza el uso del espectro.

En la Figura 4.6-A mostramos las soluciones Pareto óptimas en términos de espectro y costos de regeneración. La solución transparente se encuentra en el lado derecho del cuadro requiriendo S_{max} *slots* de espectro y 0 regeneradores, mientras que en el lado izquierdo tenemos la solución opaca con T_{max} regeneradores y S_{min} *slots* de espectro. Las opciones preferidas son aquellas que requieren menos *slots* de espectro que α_S , las resaltamos dentro de un área verde. En la Figura 4.6-B mostramos el caso en el que dado un umbral hay varias opciones preferidas. En ese caso, se selecciona la solución menos regenerada del conjunto preferido (flecha verde). Por otro lado, en la 4.6-C mostramos el caso en el que no hay opciones que requieran menos *slots* que α_S . Cuando esto sucede, la estrategia selecciona la solución con menos uso de espectro (flecha verde).

Algoritmo 4: TH-RA selección de opción de regeneración basada en umbral

```

Dado el conjunto de pareto para el camino  $p$ ,  $P(p)$ ;
Dado un umbral  $\alpha$ ;
 $P'(p) \leftarrow \{r \in P(p) \text{ and } S(r) \leq \alpha\}$ ;
if  $P'(p)$  no es vacío then
    find  $r$  |  $T(r)$  is  $\min\{T(r)|r \in P'(p)\}$ ;
     $option \leftarrow r$ ;
end
else
    find  $r$  |  $S(r)$  is  $\min\{S(r)|r \in P(p)\}$ ;
     $option \leftarrow r$ ;
end
return  $option$ 
    
```

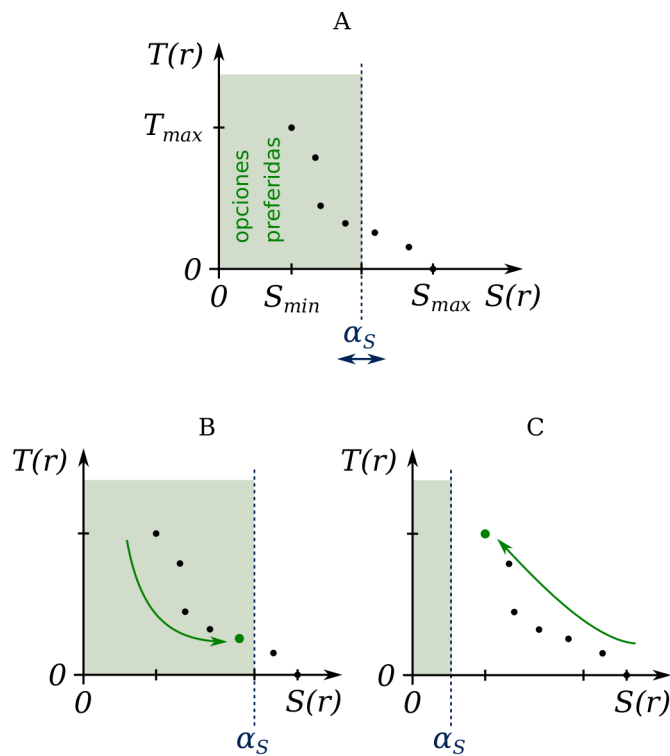


Figura 4.6: Estrategia en base a umbral

4.4.6 Estrategia basada en utilización UT-RA

La estrategia asignación de regeneradores basado en la utilización (*Utilization Based Regenerator Assigment*) (UT-RA), también responde al flujo que se muestra en la Figura 4.5 pero difiere de la estrategia basada en Umbral en la rutina de selección de opciones. La idea principal en esta estrategia es seleccionar la opción que minimice el recurso más utilizado.

La estrategia de TH-RA requiere asignar un valor α_S para cada demanda, que puede estar

relacionado con una eficiencia espectral objetivo (relación entre la tasa y el espectro). Este enfoque es adecuado para escenarios en los que la regeneración no tiene límites y los recursos de regeneración pueden aumentar para alcanzar una eficiencia objetivo. Sin embargo, si la regeneración es limitada, entonces se necesita un enfoque diferente.

En este contexto, presentamos el algoritmo consciente de la utilización (UT-RA), que selecciona la solución que mejor asigna los recursos disponibles para evitar el agotamiento temprano del espectro o de los transpondedores. Su objetivo principal es asignar recursos de manera racional para minimizar la probabilidad de bloqueo general y, por lo tanto, maximizar el tráfico transportado en la red. Con este fin, primero se calcula la utilización de espectro $U_s(p)$ y de transpondedores $U_t(p)$ a lo largo de la ruta p para determinar qué recurso es más crítico. En ambos casos, la utilización se define como la cantidad de recursos utilizados a lo largo del camino con respecto a los existentes. Por ejemplo, $U_s(p)$ se calcula como la suma de los *slots* de espectro ya asignados en cada enlace de fibra a lo largo de la ruta con respecto a la suma de los 320 *slots* de espectro proporcionadas por cada enlace. Si bien asumimos que cada enlace de fibra siempre ofrece la misma cantidad de *slots* de espectro, la cantidad de transpondedores disponibles en cada nodo puede variar y ser proporcional al grado del nodo (es decir, el número de enlaces a los que está conectado el nodo). Por tanto, $U_t(p)$ se calcula como la suma de los transpondedores en servicio a lo largo de la ruta con respecto a la suma de todos los transpondedores disponibles en cada nodo, que puede variar para cada nodo.

En este contexto, la selección de candidatos siempre se realiza de manera que el aprovisionamiento tenga el mínimo impacto en el recurso más utilizado. Si $U_s(p)$ es mayor que $U_t(p)$, entonces el espectro se considera el recurso crítico que necesita ser ahorrado. Por lo tanto, se selecciona la solución candidata que minimiza el costo del espectro $S(r)$. Sin embargo, si $U_t(p)$ es mayor que $U_s(p)$, entonces se elige la solución candidata que minimiza el costo de regeneración $T(r)$. Sin embargo, una implementación sencilla de esta estrategia puede conducir a condiciones de bloqueo innecesarias. Cuando la utilización se vuelve alta, considerar solo el recurso más utilizado para seleccionar la mejor solución puede ser contraproducente, ya que puede resultar en un aumento excesivo del recurso menos utilizado, que luego puede convertirse en el recurso más crítico. En cambio, cuando la utilización es baja, un aumento excesivo del recurso menos usado no es crítico y eventualmente se puede compensar en asignaciones sucesivas cuando se aprovisionan otras demandas.

Una alternativa a la selección del mejor candidato cuando la utilización es alta es utilizar un enfoque mín-máx sobre todos los candidatos. Esto implica que para cada candidato se estima la utilización resultante en términos de $U_s(r)$ y $U_t(r)$, y su valor máximo $\max(U_s(r), U_t(r))$ se compara con todos los demás valores máximos de los candidatos en el conjunto de Pareto $P(p)$. A continuación, se selecciona el candidato con la mínima utilización máxima. Esta estrategia tiende a seleccionar soluciones que aumenten la utilización de ambos recursos, igualando la utilización. Incluso si esta podría ser una decisión sabia cuando los recursos son escasos (es decir,

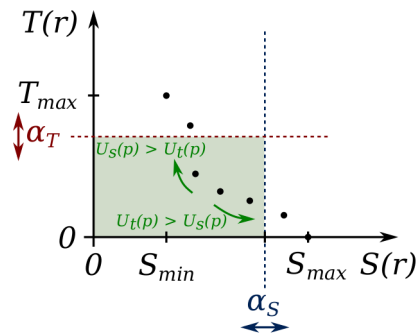


Figura 4.7: Estrategia de selección limitada en dos dimensiones

muy utilizados), puede no ser apropiado cuando son abundantes (es decir, baja utilización). En el último caso, se vuelve más relevante reducir la tasa a la que aumenta la utilización máxima a medida que se abastecen las demandas, en lugar de preocuparse por su igualación. Por ejemplo, si los recursos del espectro son más abundantes que los del transpondedor, entonces es necesario controlar la tasa de utilización del transpondedor, lo que favorecería la selección de soluciones con mínima regeneración o sin (es decir, transparentes). Sin embargo, a medida que aumenta la utilización, se requieren soluciones más igualadas para evitar el agotamiento temprano de un recurso.

Para abordar este desafío, proponemos controlar el espacio de soluciones en función de la utilización. A medida que un recurso aumenta su utilización, el espacio de la solución tiende a soluciones más igualadas en términos de espectro y costo del transpondedor. Con este fin, el algoritmo UT-RA utiliza dos umbrales, uno en términos de espectro (α_S) y otro en términos de regeneradores (α_T), para definir un conjunto de candidatos preferidos del conjunto Pareto $P(p)$. Si la utilización del espectro $U_s(p)$ a lo largo de la ruta es menor que la de transpondedores $U_t(p)$, entonces se selecciona la solución dentro de los umbrales α_S y α_T que minimizan el costo de regeneración $T(r)$. De lo contrario, si $U_t(p)$ es menor que $U_s(p)$, entonces se elige la solución que minimiza el costo del espectro $S(r)$ dentro de los umbrales. Si el conjunto preferido está vacío, la selección se realiza sobre todo el conjunto de Pareto.

En la Figura 4.7 mostramos la política propuesta. Cada punto negro representa una solución candidata. La opción opaca requiere T_{max} regeneradores y S_{min} slots de espectro, mientras que la solución transparente requiere cero regeneradores y S_{max} slots de espectro. Ahora tenemos dos presupuestos: el umbral de regeneradores α_T y el umbral de espectro α_S . Las soluciones preferidas son aquellas que están simultáneamente debajo de α_T y α_S (área verde).

Con el fin de adaptarse a los cambios en el estado de la red y a los requisitos de las demanda (tasa de bits, longitud de la ruta), los umbrales se calculan dinámicamente para cada nuevo proceso de aprovisionamiento. El umbral de regeneradores depende de la utilización de transpondedores sobre la ruta p ($U_t(p)$) y de los requisitos de regeneración de las soluciones opaca y transparente ($T_{max}, 0$) siguiendo la expresión que se muestra en la Ecuación 4.5. El

umbral de espectro depende de la utilización de espectro sobre la ruta ($U_s(p)$) y los requisitos de espectro de las soluciones opaca y transparente (S_{min} y S_{max}) siguiendo la expresión mostrada en la Ecuación 4.6.

$$(4.5) \quad \alpha_T = T_{max}(1 - \beta)(1 - U_t(p))$$

$$(4.6) \quad \alpha_S = (S_{max} - S_{min})(1 - \beta)(1 - U_s(p)) + S_{min}$$

En la Figura 4.8 mostramos el método propuesto para la selección de candidatos. Dada una nueva demanda que necesita ser aprovisionada en un camino, se determina el conjunto de Pareto. Luego, ambos umbrales (α_S , α_T) se calculan usando las Ecuaciones 4.6 y 4.5. Estos umbrales determinan el conjunto de opciones preferido (área verde), que está compuesto por todas las opciones de regeneración que requieren menos *slots* de espectro que α_S y menos regeneradores que α_T . Finalmente, la opción que minimiza el recurso más utilizado se selecciona del conjunto preferido. Si el conjunto preferido está vacío, entonces la opción se selecciona del conjunto de Pareto minimizando el recurso más utilizado.

El umbral del espectro se calcula como una función lineal de la utilización del espectro parametrizada por los requisitos del espectro de las soluciones opaca y transparente, S_{min} y S_{max} . El umbral puede variar entre S_{min} y $S_{max} + \beta(S_{max} - S_{min})$. Cuando la utilización es pequeña, el umbral obtiene un valor ligeramente mayor que S_{max} (β es un valor pequeño).

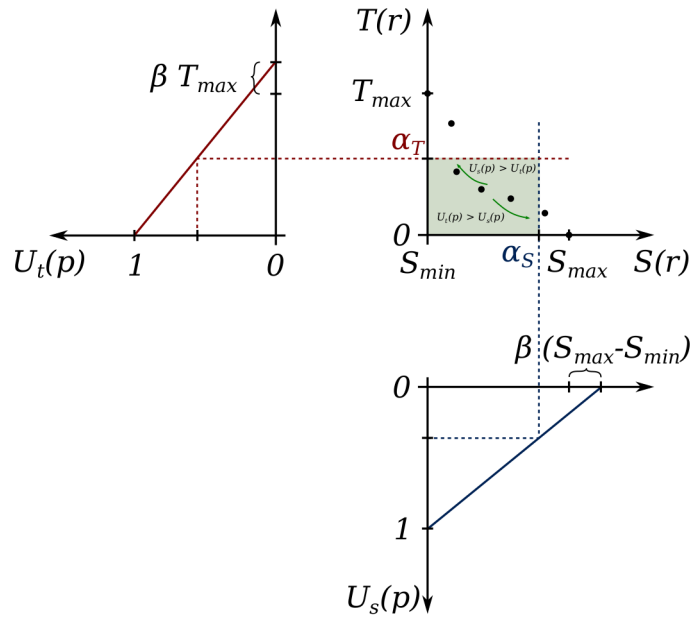


Figura 4.8: Estrategia de selección limitada en dos dimensiones con cómputo de umbrales en base a utilización

Entonces, no se impone ningún límite en términos de espectro, pero a medida que aumenta la utilización de espectro sobre la ruta ($U_s(p)$), el umbral disminuye. Cuando la utilización tiende a 1, el umbral tiende a S_{min} , lo que significa que se prefieren opciones más regeneradas. De manera similar, el umbral de regeneración se calcula como una función lineal de la utilización de transpondedores sobre la ruta parametrizada por los requisitos de regeneración de las soluciones opaca y transparente ($T_{max}, 0$). Cuando la utilización de transpondedores es cercana a cero, el umbral es superior a T_{max} y todas las soluciones se consideran como preferidas. A medida que aumenta la utilización, el umbral disminuye hasta cero cuando la utilización es 1. El comportamiento general es que cuando la red no está cargada y la utilización es pequeña, se incluyen todas las soluciones posibles. A medida que aumenta la utilización, el conjunto preferido se vuelve cada vez más limitado y se priorizan soluciones más equilibradas. A medida que se minimiza el recurso más utilizado, en sucesivas demandas la utilización de espectro y de transpondedores permanecen equilibrados. El parámetro β es un valor pequeño cercano a cero determinado por ajuste que asegura que las soluciones opacas y transparentes se incluyen cuando la utilización es cercana a cero.

Los detalles de la rutina de selección de opciones se pueden encontrar en el Algoritmo 5. Esta estrategia ajusta los umbrales (α_T y α_S) al estado actual de la red utilizando el espectro y la

utilización de la ruta del transpondedor como referencia.

Algoritmo 5: UT-RA selección de opción de regeneración basada en utilización

Dado el conjunto de Pareto para el camino p , $P(p)$;
 Calcular $U_t(p)$ (utilización de transpondedores de p);
 Calcular $U_s(p)$ (utilización de espectro de p);
 Calcular $S_{max}(p)$ (slots de espectro de la opción transparente);
 Calcular $S_{min}(p)$ (slots de espectro de la opción opaca);
 Calcular $T_{max}(p)$ (número de regeneradores de la opción opaca);
 $\alpha_T \leftarrow (1 - \beta) \times (1 - U_t(p)) \times T_{max}(p)$;
 $\alpha_S \leftarrow (1 - \beta) \times (1 - U_s(p)) \times (S_{max}(p) - S_{min}(p)) + S_{min}(p)$;
 $P'(p) \leftarrow \{r \in P(p) \mid S(r) \leq \alpha_S \text{ and } T(r) \leq \alpha_T\}$;
if $P'(p)$ *is vacío* **then**
 | $P'(p) \leftarrow P(p)$;
end
if $U_t(p) > U_s(p)$ **then**
 | **encontrar** $r \mid T(r)$ *is* $\min\{T(r) \mid r \in P'(p)\}$;
 | $option \leftarrow r$;
end
else
 | **encontrar** $r \mid S(r)$ *is* $\min\{S(r) \mid r \in P'(p)\}$;
 | $option \leftarrow r$;
end
return $option$

Si el conjunto de soluciones inicial $R(p)$ incluye todas las soluciones posibles, entonces la complejidad de nuestros algoritmos propuestos se vuelve combinatoria. Por tanto, al igual que en algoritmo TH-RA, introducimos un límite en el número de nodos intermedios que se incluyen en la base de las combinaciones. A esto lo llamamos límite ρ . Una vez que se establece la ruta, se seleccionan aleatoriamente ρ nodos intermedios para formar la base descartando aquellos que no tienen transpondedores disponibles. Por lo tanto, la base tendrá como máximo ρ nodos intermedios y el número máximo de opciones de regeneración está acotado por 2^ρ para mantener la complejidad manejable.

4.5 Resultados

En esta sección analizamos resultados de simulación para evaluar los algoritmos propuestos. En primer lugar analizamos el comportamiento del algoritmo TH-RA para escenarios sin límite en el número de transpondedores. Luego mostramos el comportamiento del algoritmo para el caso con límite en el número de transpondedores por nodo y lo comparamos con el comportamiento

del algoritmo UT-RA. Para las dos primeras subsecciones utilizamos la topología de red europea COST266 que tiene 37 nodos y 57 enlaces. En la última subsección evaluamos el rendimiento del algoritmo UT-RA para la topología de red ARGENTINA-CORE de Argentina y para la topología de red US24 de los Estados Unidos. Las tres topologías se muestran en la Figura 4.9. Tanto para la estrategia TH-RA como para la estrategia UT-RA se asigna un límite máximo al número de regeneradores de $\rho = 8$ regeneradores por demanda a no ser que se diga lo contrario.

Consideramos toda la banda C (4 THz) dividida en 320 *slots* de espectro de 12.5 GHz. Para simplificar, consideramos un *slot* vacío como banda de protección entre los canales adyacentes. Un transpondedor elástico que admite BPSK, QPSK, (8, 16, 32, 64)-QAM ($\eta \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$), 25 % de sobrecarga para el FEC para lograr un BER=1e-2 ($H = 25$), y se supone una tasa de transmisión máxima de 50 Gbaud/s ($B = 50$). Todos los impedimentos físicos se consideran utilizando el modelo GN [57].

Consideramos demandas de tráfico dinámico de tasa de bits mixta de 100 Gb/s, 200 Gb/s y 400 Gb/s. Los tiempos de llegada y retención de la demanda siguen procesos independientes de Poisson. El origen, el destino y la tasa de bits se seleccionan aleatoriamente mediante distribuciones uniformes. Todos los resultados mostrados se obtuvieron ejecutando 40 simulaciones independientes con 40 semillas diferentes con 500000 llegadas de demanda cada una. También informamos el intervalo de confianza de los valores como una sombra alrededor de los puntos, en la mayoría de los casos el intervalo de confianza está tan cerca del valor medio que no se puede apreciar.

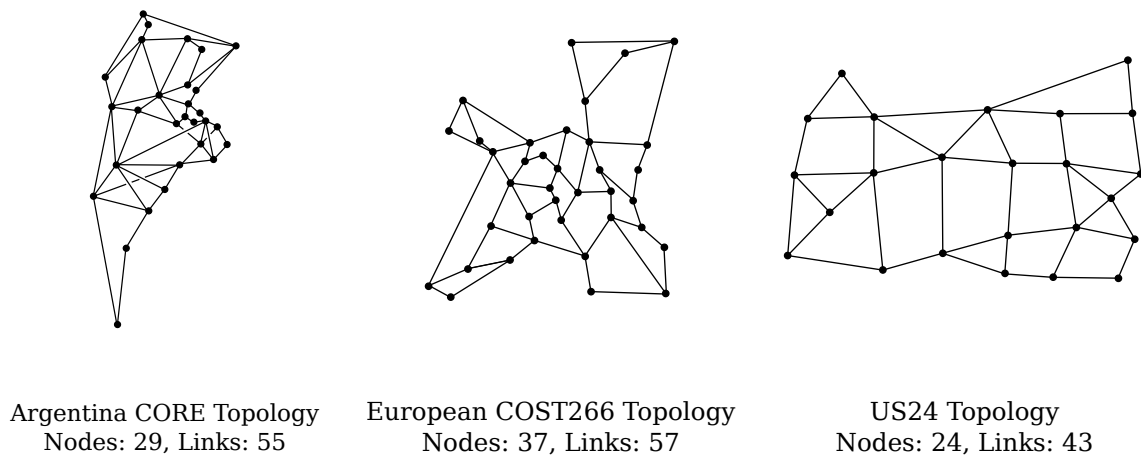


Figura 4.9: Topologías utilizadas para el análisis

4.5.1 Algoritmo basado en umbral

En [31], propusimos el algoritmo TH-RA que selecciona una opción del conjunto de Pareto usando una estrategia basada en un umbral llamado α . Esta estrategia de aprovisionamiento se describe en la Sección 4.4.5. En esta sección mostramos los resultados obtenidos usando esta estrategia y

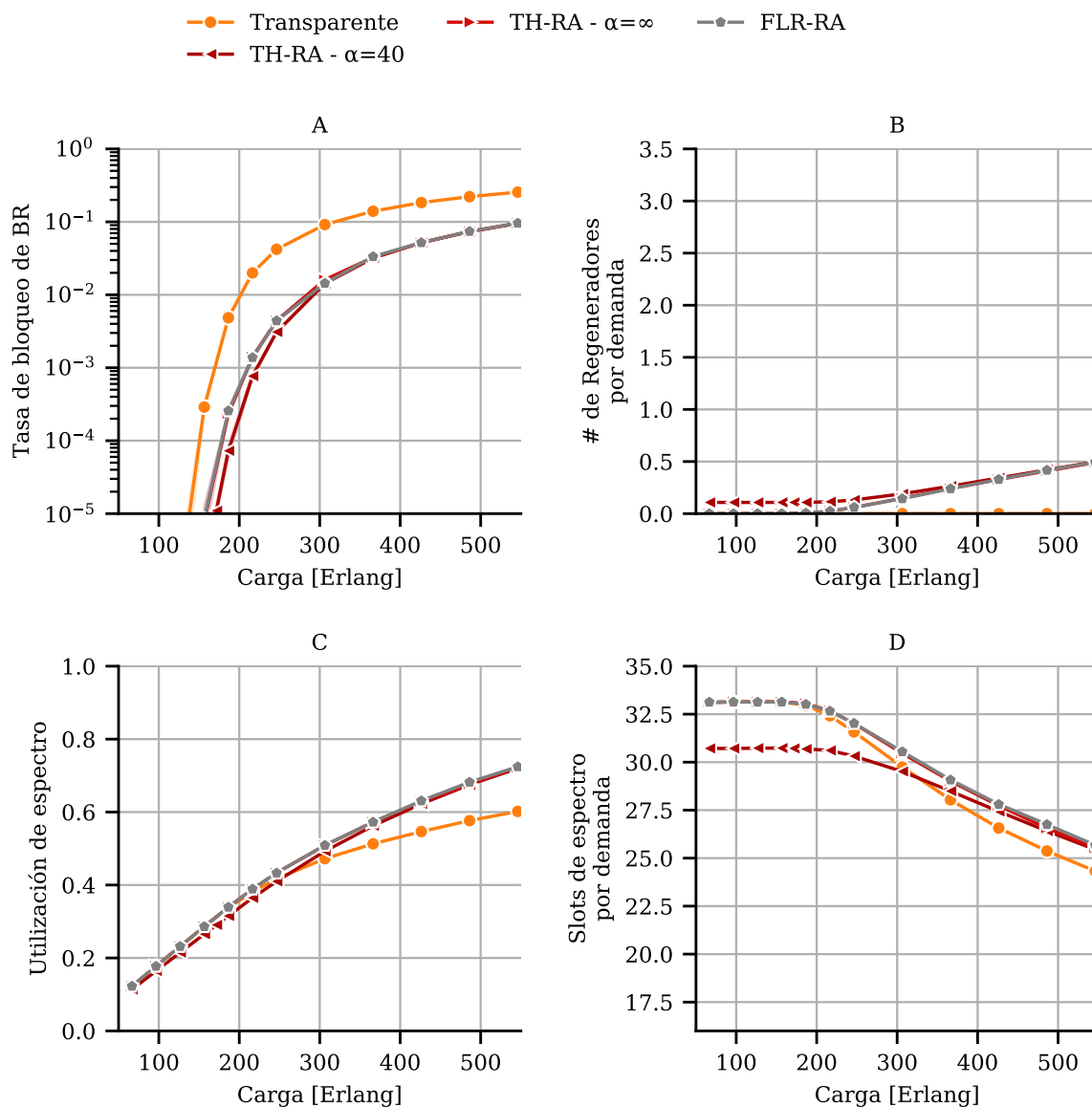


Figura 4.10: Resultados para estrategias que minimizan el uso de transpondedores sobre la topología Europea COST266 bajo tráfico dinámico de *bitrate* mixto y sin límite al número de transpondedores por nodo. A) Tasa de bloqueo de *bitrate* vs carga, B) Número de regeneradores por demanda vs carga, C) Utilización de espectro vs carga, D) *slots* de espectro por demanda vs carga.

discutimos sus limitaciones. Consideramos los resultados obtenidos utilizando las estrategias *Transparente*, *Opaco* y TH-RA.

4.5.1.1 Número ilimitado de transpondedores por nodo

En primer lugar, consideramos un escenario ideal donde no hay límite en el número de transpondedores. Esto significa que una demanda sólo puede bloquearse debido a la falta de espectro. Consideramos cuatro valores para el umbral α $\{0, 10, 40, \infty\}$. Estos valores están en términos de *slots* de espectro, por lo tanto, cuando $\alpha = 0$ el algoritmo siempre seleccionará la opción que minimiza el uso del espectro y cuando $\alpha = \infty$ el algoritmo siempre seleccionará la opción que minimice el número de regeneradores. Los valores intermedios de α darán como resultado soluciones equilibradas.

Las estrategias pueden clasificarse entre aquellas que intentan minimizar el uso de transpondedores (*Transparente*, FNS-RA y TH-RA- $\alpha \rightarrow 0$) y aquellas que intentan minimizar el espectro (*Opaca*, FLR-RA y TH-RA- $\alpha \rightarrow \infty$).

→ Estrategias que minimizan el uso de transpondedores

En la Figura 4.10 mostramos la tasa de bloqueo a nivel de *bitrate*, el número de regeneradores por demanda y número de *slots* de espectro por demanda versus la carga de red para las estrategias que intentan minimizar el uso de regeneración. La estrategia *Transparente* no utiliza regeneración, por lo que una demanda se aprovisiona mediante una transmisión de extremo a extremo o bien se bloquea. El número de regeneradores por demanda siempre es cero y el número de *slots* de espectro por demanda es máximo ya que ninguna opción de regeneración puede requerir más *slots* de espectro que la opción *Transparente*. Como resultado, en este escenario sin límite en el número de transpondedores disponibles, la estrategia *Transparente* tiene el peor rendimiento en términos de tasa de bloqueo *bitrate*. Cuando la carga crece por encima de los 200 Erlangs, la probabilidad de bloqueo se vuelve significativa (más de 10^{-2}) y el número de *slots* de espectro por demanda comienza a disminuir. Esta disminución en el número de *slots* de espectro por demanda no responde a un mejor uso del espectro, es el resultado de un desbalanceo en la tasa de bloqueo entre demandas con diferentes requerimientos de espectro. Aquellas demandas que requieren grandes cantidades de *slots* de espectro tienen más probabilidad de ser bloqueadas que aquellas que requieren menos cuando se usa la estrategia *Transparente*. Para este escenario, los resultados obtenidos con la estrategia *Transparente* se pueden usar como base para comparar el resto de las estrategias.

Por su parte la estrategia FLR-RA permite incrementar la cantidad de regeneradores con el objetivo de disminuir la tasa de bloqueo del caso *Transparente*, como puede apreciarse en la Figura 4.10-A/B. A partir de los 200 Erlang la cantidad de regeneración empieza a aumentar hasta alcanzar los 0.5 regeneradores por demanda para 550 Erlang. Este pequeño incremento en el número de regeneradores que puede pensarse como que en promedio menos de la mitad de las demandas incluyen un regenerador permite disminuir notablemente la probabilidad de bloqueo. Por ejemplo, para 300 Erlang un incremento de 0.2 regeneradores por demanda permite disminuir la tasa de bloqueo en casi 10 veces con respecto al caso *Transparente*. En la Figura

4.10-C se puede observar como el uso de regeneradores permite mejorar el uso del espectro para altas cargas de red ya que incluso con una utilización de espectro mayor, las estrategias que admiten regeneración logran una menor tasa de bloqueo que el caso *Transparente*.

El algoritmo TH-RA con $\alpha = \infty$ se comporta prácticamente igual que el FLR-RA. Permitiendo disminuir la probabilidad de bloqueo mediante el uso de regeneración. Con la cantidad de regeneradores tendiendo a cero para bajas cargas y manteniéndose por debajo de 0.5 regeneradores por demanda para altas cargas. Sin embargo, cuando se utiliza un $\alpha = 40$ se puede observar que la cantidad de regeneradores por demanda es ligeramente superior a cero incluso para cargas bajas, como se puede apreciar en la Figura 4.10-B. Esto permite comprimir el espectro bajando de 33 a 31 *slots* por demanda promedio, 4.10-C lo que da como resultado una leve disminución de la tasa de bloqueo.

→ Estrategias que minimizan el uso de espectro

En la Figura 4.11 mostramos los resultados para el mismo escenario para las estrategias que intentan minimizar el uso de espectro. La estrategia *Opaca* intenta usar regeneración en cada salto, como resultado el número de regeneradores por demanda aumenta por encima de tres, Figura 4.11-B. El uso de regeneración en cada nodo intermedio garantiza el uso del formato de modulación más alto disponible en cada enlace. Los formatos de modulación disponibles pueden diferir de un enlace a otro dependiendo de la longitud del enlace. Los formatos de modulación de orden superior permiten un mejor uso de espectro, como se puede ver en la Figura 4.11-C. La disminución en el espectro requerido por cada demanda da como resultado menores tasas de bloqueo para este escenario sin límite en el número de transpondedores. Este comportamiento se puede apreciar en la Figura 4.11-A, la ganancia en términos de probabilidad de bloqueo obtenida usando la estrategia *Opaca* en lugar de *Transparente* es mayor a mil veces en condiciones de baja carga y mayor a diez veces en condiciones de alta carga. Sin embargo, esta ganancia tiene un costo en términos de regeneradores, como se muestra en la Figura 4.11-B, la estrategia *Opaca* necesita un número promedio de tres regeneradores por demanda, lo que significa un incremento en el costo de tres veces en comparación con la estrategia *Transparente* que solo usa dos transpondedores por demanda (cero regeneradores).

Como mencionamos anteriormente, existe una relación de compromiso entre el uso del espectro y el uso de regeneradores. Esta relación se puede apreciar comparando la Figuras 4.10-B/4.11-B con 4.10-C/4.11-C, el número de *slots* de espectro por demanda requerida por la estrategia *Transparente* es grande en comparación con la cantidad requerida por la estrategia *Opaca* mientras que la estrategia *Opaca* requiere muchos más regeneradores que la estrategia *Transparente*. En otras palabras, a medida que aumenta el número de regeneradores, disminuye el número de *slots* de espectro requeridas y, para este escenario, se produce una disminución de la tasa de bloqueo.

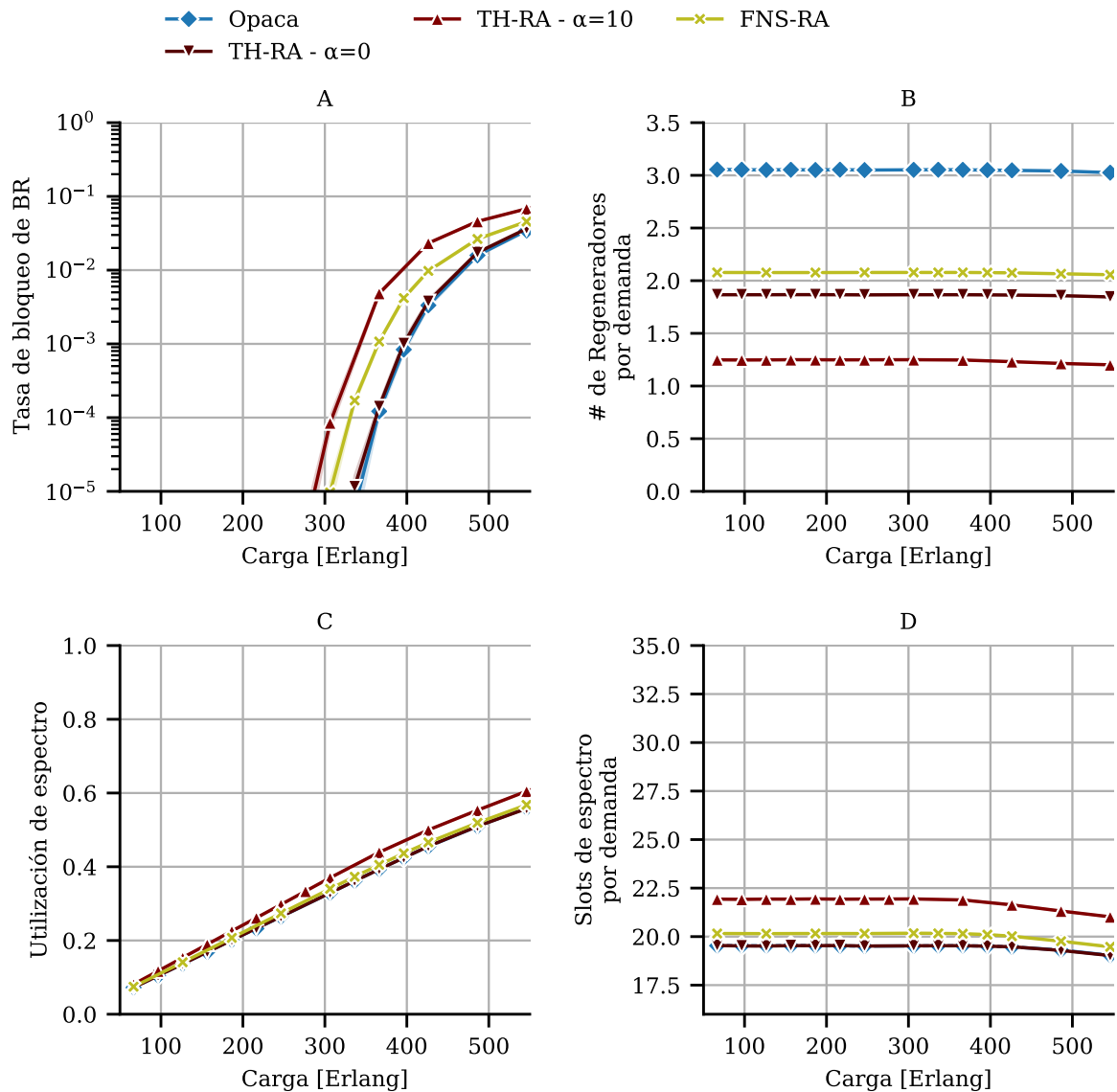


Figura 4.11: Resultados para estrategias que minimizan el uso de espectro sobre la topología Europea COST266 bajo tráfico dinámico de *bitrate* mixto y sin límite al número de transpondedores por nodo. A) Tasa de bloqueo de *bitrate* vs carga, B) Número de regeneradores por demanda vs carga, C) Utilización de espectro vs carga, D) *slots* de espectro por demanda vs carga.

La estrategia FNS-RA intenta utilizar el formato de modulación de mayor orden en la mayor cantidad de saltos posibles. Esto implica que el uso de regeneradores es alto, en el orden de 2 regeneradores por demanda para este escenario. Obteniendo así un uso de espectro similar al caso *Opaco*. Esto implica que las tasas de bloqueo también serán bajas como puede observarse en la Figura 4.11-A. Sin embargo, en este escenario esta estrategia no logra obtener tan buenos

resultados como la estrategia *Opaca*.

Por su parte, la estrategia TH-RA con $\alpha = 0$ logra obtener los mismos resultados que el caso *Opaco* en términos de tasa de bloqueo pero utilizando menos regeneradores y menos espectro que FNS-RA. Al aumentar el valor de α a 10 se logra disminuir aún más el uso de regeneradores hasta 1.2 regeneradores por demanda. Claro que esta disminución en el número de regeneradores implica un empeoramiento de la tasa de bloqueo.

En este escenario sin límite de transpondedores, las tasas de bloqueo obtenidas con el algoritmo TH-RA siempre están entre los resultados de las estrategias *Opaca* y *Transparente*. Como se puede ver en la Figuras 4.10-A y 4.11-A, el algoritmo TH-RA con $\alpha = 0$ se desempeña de la misma manera que estrategia *Opaca* en términos de tasa de bloqueo de *bitrate*. Sin embargo, requiere una cantidad mucho menor de regeneradores por demanda (por debajo de dos regeneradores por demanda) mientras que utiliza prácticamente la misma cantidad de *slots* de espectro. Esto sucede porque la estrategia *Opaca* intenta maximizar el uso del regenerador incluso en el caso en que no se obtengan ganancias de espectro. Mientras que el algoritmo TH-RA selecciona la opción de aprovisionamiento del conjunto de Pareto. Lo que significa que no se seleccionará una opción que no tenga una ganancia en términos de *slots* de espectro. A medida que aumenta el valor del umbral alfa, la tasa de bloqueo empeora y el costo relacionado con la regeneración/espectro disminuye/aumenta. Por ejemplo: con un umbral α de 40 *slots*, comparando con la estrategia *Transparente* un aumento por debajo de 0.2 regeneradores por demanda da como resultado una ganancia de tasa de bloqueo de más de diez veces en condiciones de baja carga. Con un umbral α establecido en 10, un aumento de 1.2 regeneradores por demanda da como resultado una ganancia de tasa de bloqueo mayor a mil veces en comparación con la tasa de bloqueo obtenida con la estrategia *Transparente* en condiciones de carga baja y mayor a diez veces en condiciones de carga alta.

En un escenario sin límite en el número de regeneradores, la cantidad de regeneradores (transpondedores) necesarios para aprovisionar una demanda puede ser pensado como un costo de despliegue. En este contexto la estrategia TH-RA permite establecer un presupuesto en términos de espectro para limitar la probabilidad de bloqueo y simultáneamente minimizar el costo asociado a los regeneradores. Incluso permitiendo en el caso extremo obtener probabilidades de bloqueo equivalentes a la estrategia *Opaca* pero reduciendo significativamente el costo en términos de transpondedores.

4.5.1.2 Número limitado de transpondedores

Consideremos ahora un escenario con un número limitado de transpondedores por nodo, más aún, consideremos un escenario en el que el número de transpondedores en un nodo es proporcional al grado del nodo. En este escenario, todos los transpondedores disponibles en un nodo son compartidos y pueden usarse para transmisión y/o regeneración. Cada regenerador consume dos transpondedores del grupo mientras que la transmisión sólo consume uno. Evaluamos el mismo

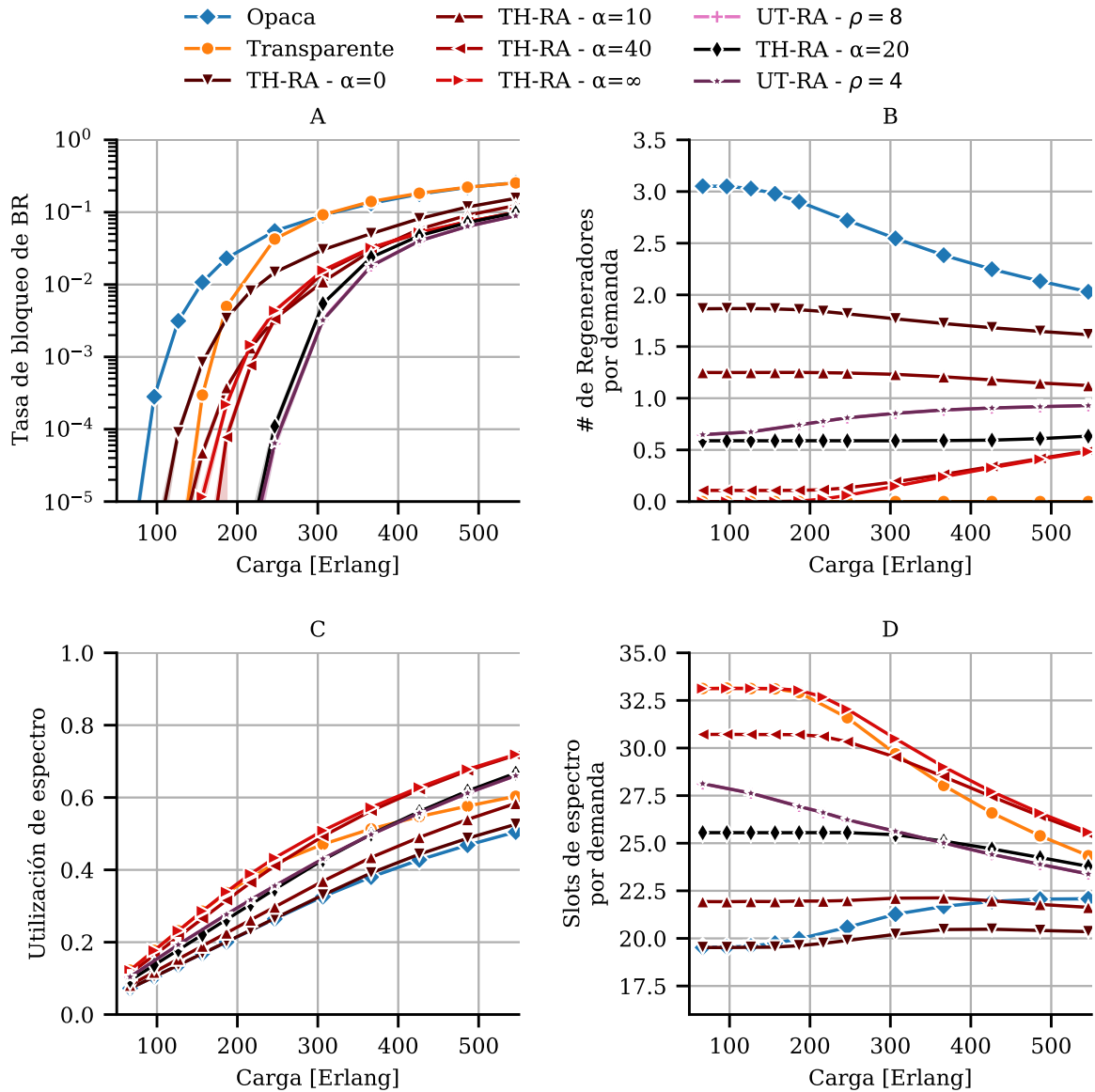


Figura 4.12: Resultados de simulación para el algoritmo TH-RA para la topología Europea COST266 bajo tráfico dinámico de tasa de bits mixta y 20 transpondedores por nodo por grado del nodo. A) Tasa de bloqueo de *bitrate* vs Carga de la red, B) Número de regeneradores por demanda vs Carga de la red, C) *slots* de espectro vs Carga de la red.

entorno de simulación que utilizamos en la Sección anterior cambiando únicamente el límite de transpondedores.

En la Figura 4.12 mostramos la tasa de bloqueo de tasa de bits, el número de regeneradores por demanda y *slots* de espectro por demanda versus la carga de red para la topología COST266 con 20 transpondedores por nodo por grado de nodo. Consideramos el mismo tráfico y las mismas

semillas que usamos para el caso ilimitado. Lo primero a tener en cuenta aquí es que la estrategia *Opaca*, que tiene el mejor rendimiento en el caso ilimitado en términos de tasa de bloqueo, ahora tiene el peor rendimiento. Incluso peor que la estrategia *Transparente*. Además, las estrategias *Opaca* y *Transparente* funcionan peor que el algoritmo basado en el umbral en casi todas las condiciones de carga. Cuando el número de transpondedores por nodo está acotado, ni las estrategias *Opaco* ni *Transparente* son buenas opciones en comparación con la estrategia TH-RA.

Consideremos ahora el funcionamiento del algoritmo TH-RA. Incluso si esta estrategia funciona mejor que las tradicionales, cuando se limita el número de transpondedores, se pierde la relación directa entre el α y la tasa de bloqueo. Esto quiere decir que a diferencia del caso sin límite de transpondedores un aumento en el umbral α puede significar un aumento de la probabilidad de bloqueo en lugar de una disminución. Por ejemplo, con 20 transpondedores por nodo por grado de nodo, como se puede ver en la Figura 4.12-A, el algoritmo está obteniendo el mejor rendimiento con un alfa de 40 *slots*.

En términos de número de regeneradores y número de *slots* de espectro por demanda, Figuras 4.12-B, 4.12-C, no hay mucha diferencia en comparación con el caso ilimitado. Esto sucede porque estos resultados se calculan sobre las demandas aceptadas, luego las decisiones tomadas por el algoritmo TH-RA impactan de la misma manera en estas métricas. El comportamiento del número de *slots* de espectro requeridas por las estrategias *Transparente* y *Opaca* difieren del escenario ilimitado principalmente por el efecto de la alta tasa de bloqueo experimentada en condiciones de alta carga. Por ejemplo, la cantidad de *slots* de espectro requeridas por la estrategia *Opaca* aumenta con la carga mientras disminuye el número de regeneradores. Esto sucede porque, la estrategia *Opaca* consume los transpondedores disponibles de rápidamente, ocasionando que en condiciones de alta carga, la cantidad de transpondedores disponibles para la regeneración sea baja y que por lo tanto se deban usar opciones menos regeneradas.

En la Figura 4.13 mostramos la tasa de bloque de *bitrate* en función de la cantidad de transpondedores por nodo por enlace para la estrategia TH-RA y la estrategia UT-RA. Nos concentraremos por ahora en el comportamiento de la estrategia basada en umbral y luego volveremos sobre esta Figura para comparar su funcionamiento con la estrategia UT-RA. Como puede verse, la probabilidad de bloqueo es alta cuando se cuenta con un número reducido de transpondedores por nodo por enlace (5) y a medida que la cantidad de transpondedores disponibles aumenta la probabilidad de bloqueo tiende a disminuir hasta cierto punto y luego se estabiliza para $\alpha = 20, 30, 40, \infty$. Estos resultados fueron obtenidos a carga constante de 250 Erlang y para esta carga no se puede observar este comportamiento de estabilización de la probabilidad de bloqueo para $\alpha = 0, 10$. Sin embargo, esto no quiere decir que exista, simplemente que no podemos detectarlo en nuestra simulación. Lo más importante a destacar de esta Figura es que el mejor umbral α depende de la cantidad de transpondedores disponibles. Por ejemplo, para un límite de 10 transpondedores por enlace por nodo la menor tasa de bloqueo se obtiene con $\alpha = 30$, para un límite de 20 transpondedores por enlace por nodo con $\alpha = 20$ y para un límite

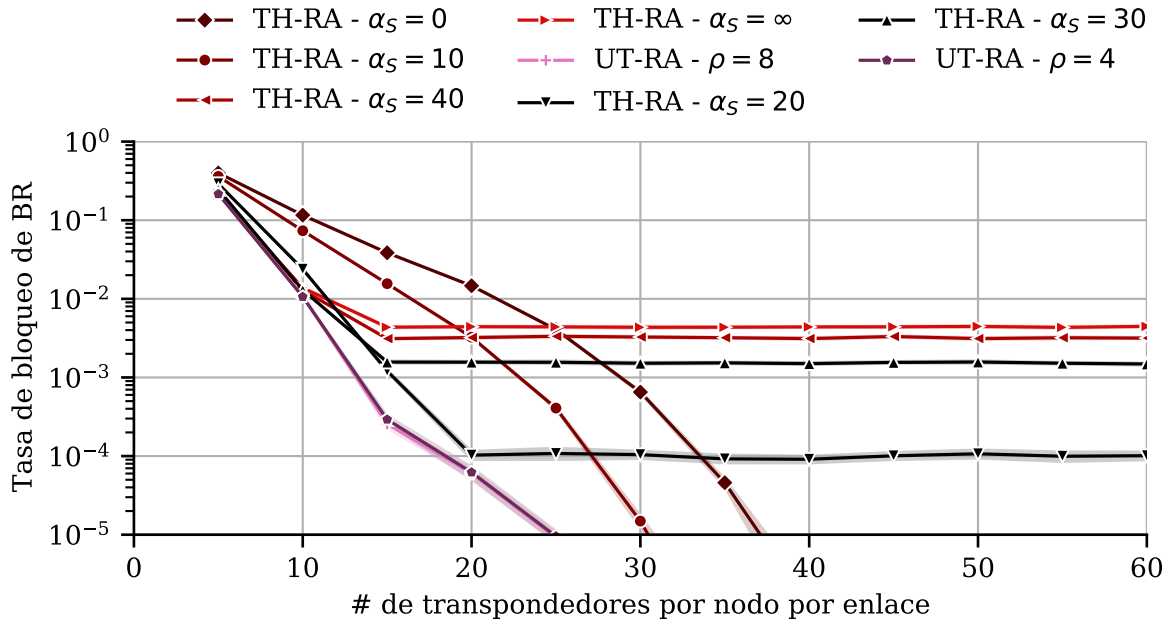


Figura 4.13: Resultados de simulación para el algoritmo TH-RA para la topología Europea COST266 bajo tráfico dinámico de tasa de bits mixta, tasa de bloque de *bitrate* vs número de transpondedores por nodo por enlace para una carga constante de 250 Erlang.

de 30 transpondedores por enlace por nodo con $\alpha = 10$. Esto sucede debido al hecho de que al disminuir el umbral el algoritmo tiende a usar más cantidad de transpondedores y por lo tanto si hay pocos transpondedores disponibles un umbral bajo puede agotarlos de forma temprana incrementando el bloqueo por falta de transpondedores.

El algoritmo TH-RA se basa en minimizar el número de regeneradores dado un presupuesto de espectro, esto lleva a que en los casos donde ambos recursos están limitados se deba codificar en el umbral α la disponibilidad de ambos recursos. Si bien mediante simulación es posible encontrar el mejor umbral para cada situación no encontramos una estrategia práctica para determinar el umbral α . Una estrategia que sólo optimice uno de los recursos siempre será inadecuada como en el caso del *basado en el umbral*. En la siguiente sección, presentamos resultados para el algoritmo UT-RA que tiene en cuenta la optimización de ambos recursos, dando prioridad al más utilizado.

En un escenario con límite en el número de transpondedores por nodo el número de regeneradores (transpondedores) necesario por demanda no puede pensarse como un costo. En este tipo de escenarios las estrategias que tienden a minimizar alguno de los dos recursos tienden a obtener malos resultados ya que presentan bloqueo prematuro ya sea por falta de espectro (*Transparente*, FLR-RA) o por falta de transpondedores (*Opaca*, FNS-RA). En cambio las estrategias conscientes de los recursos como (TH-RA, UT-RA) permiten hacer un uso racional y balanceado de los recursos y por lo tanto minimizar la probabilidad de bloqueo. En el caso de

la estrategia TH-RA es necesario ajustar el valor de α (dependerá de la disponibilidad de los recursos)

4.5.2 Algoritmo basado en utilización

El algoritmo *TH-RA* requiere un ajuste del parámetro α dependiendo del estado de la red y de las características de las demandas. Con el objetivo de obtener un algoritmo que no necesite este ajuste y pueda adaptarse a estos factores de forma automática propusimos el algoritmo *UT-RA* que optimiza ambos recursos (transpondedores y *slots* de espectro) simultáneamente.

Este algoritmo determina un conjunto de opciones de regeneración preferidas a partir del conjunto de Pareto un función de la utilización de espectro y transpondedores del camino y en función de los requerimientos de espectro y transpondedores de la demanda. Una vez determinado el conjunto preferido se selecciona la opción que minimice el recurso más utilizado. Cuando las utilizations son bajas se le permite al algoritmo elegir cualquier opción, por lo que en este caso se tiende a utilizar opciones extremas (cercanas a transparente o opaca). A medida que la utilización crece, se empieza a restringir el conjunto preferido y se utilizan opciones más balanceadas. Este comportamiento permite tener un algoritmo que se adapta tanto a las necesidades de las diferentes demandas como también al estado de la red.

En la Figura 4.12 comparamos el rendimiento del algoritmo *UT-RA* con los algoritmos *Transparente*, *Opaco* y *TH-RA* para el mismo escenario con 20 transpondedores por nodo por grado de nodo. Como puede verse, el algoritmo *UT-RA* supera a todas las otras estrategias en términos de probabilidad de bloqueo. También se puede ver que esta estrategia usa menos regeneración que el algoritmo *TH-RA* con alfa cero y menos *slots* de espectro que el algoritmo *TH-RA* con α infinito. En general, en términos de uso de recursos, el algoritmo *UT-RA* siempre se encuentra entre las estrategias altamente regeneradas y las de baja regeneración. Si comparamos la estrategia *UT-RA* con la *TH-RA* con $\alpha = 20$ vemos que la primera permite obtener menor tasa de bloqueo independientemente de la carga. Para obtener esta mejora el algoritmo *UT-RA* se adapta a medida que la carga aumenta. Podemos ver que a bajas cargas ambas estrategias utilizan prácticamente la misma regeneración, sin embargo a medida que aumenta la carga la estrategia *UT-RA* aumenta el uso regeneración y de esta manera reduce la utilización de espectro manteniendo así baja la probabilidad de bloqueo.

En la Figura 4.13 comparamos el comportamiento de *UT-RA* con la estrategia *TH-RA* en términos de la tasa de bloqueo versus el número de transpondedores por enlace por nodo a carga constante de 250 Erlang. Como puede observarse, la estrategia *UT-RA* permite minimizar la tasa de bloqueo independientemente del límite de transpondedores por enlace por nodo. Esto sucede gracias a la capacidad de este algoritmo de adaptarse al estado de la red. Podemos decir que si bien posible encontrar un umbral α para el algoritmo *TH-RA* que permita obtener resultados similares a los obtenidos con el algoritmo *UT-RA* para cada límite de transpondedores, la estrategia *UT-RA* presenta la virtud de no necesitar ajustar ningún parámetro.

En general cuando el número de transpondedores está limitado y el uso de transpondedores puede pensarse como un recurso a ser optimizado al igual que el espectro, el algoritmo UT-RA presenta mejores prestaciones que el algoritmo TH-RA. En el resto de esta sección solo discutiremos los resultados para el algoritmo UT-RA. Consideramos los resultados obtenidos usando las estrategias *Transparente*, *Opaco*, UT-RA, FLR-RA y FNS-RA.

Cuando el número de transpondedores por nodo está limitado, ya no tiene sentido pensar el problema como un problema de minimización de costo, es su lugar conviene pensarlo como un problema de asignación de recursos con el objetivo de minimizar ciertas métricas. Es por esto que no tiene sentido analizar la cantidad de transpondedores y la cantidad de *slots* de espectro por demanda. En cambio, analizaremos las métricas Tasa de bloqueo de *bitrate*, tasa de bloqueo de demandas, tasa de bloqueo por falta de espectro y tasa de bloqueo por falta de transpondedores y finalmente las tasas de bloqueo por tipo de demanda.

En la Figura 4.14 mostramos la tasa de bloqueo de *bitrate*, de demanda, de espectro y de transpondedores para la topología europea COST266 con 20 transpondedores por nodo por grado de nodo y el mismo tráfico dinámico que utilizamos en la sección anterior. El algoritmo UT-RA presenta un mejor comportamiento que las otras estrategias en términos de tasa de bloqueo de *bitrate* y de demandas, Figura 4.14-A/B. Para condiciones de baja carga, el algoritmo UT-RA obtiene tasas de bloqueo cien veces más bajas que FLR-RA que es la mejor de todas las otras estrategias.

La tasa de bloqueo de espectro y la tasa de bloqueo de transpondedores se calculan sobre las opciones evaluadas. Esto significa que estamos considerando que una demanda se bloquea en el espectro cuando al menos una de sus opciones está bloqueada en el espectro. Del mismo modo, una demanda queda bloqueada por transpondedores siempre que al menos una de sus opciones está bloqueada por el transpondedores. Una demanda puede bloquearse simultáneamente por espectro y por transpondedores, por lo tanto, la suma de estas dos tasas de bloqueo puede estar por encima de la tasa de bloqueo total. La estrategia *Opaca* usa siempre menos espectro que las estrategias *Transparente* y UT-RA, esta es la razón para que su tasa de bloqueo de espectro sea baja como puede observarse en la Figura 4.14-C. Claramente, como esta estrategia siempre trata de usar tanta regeneración como sea posible, la tasa de bloqueo de transpondedores es la más alta. Por otro lado, la estrategia *Transparente* tiene un bloqueo de espectro muy alto y un bloqueo de transpondedores muy bajo. Una demanda solo se bloquea por transpondedores en la estrategia *Transparente* cuando no hay transpondedores disponibles para la transmisión en condiciones de alta carga. La estrategia FLR-RA tiene un comportamiento similar al de *Transparente* con una relación de bloqueo de transpondedores más alta ya que esta estrategia usa algunos transpondedores para la regeneración. Por su parte la estrategia FNS-RA parecería tener el peor rendimiento ya que tiene una alta tasa de bloqueo tanto en términos de espectro como de transpondedores. Sin embargo la tasa de bloqueo de espectro en este caso puede ser engañosa ya que esta estrategia evalúa opciones que están bloqueadas por espectro debido a su

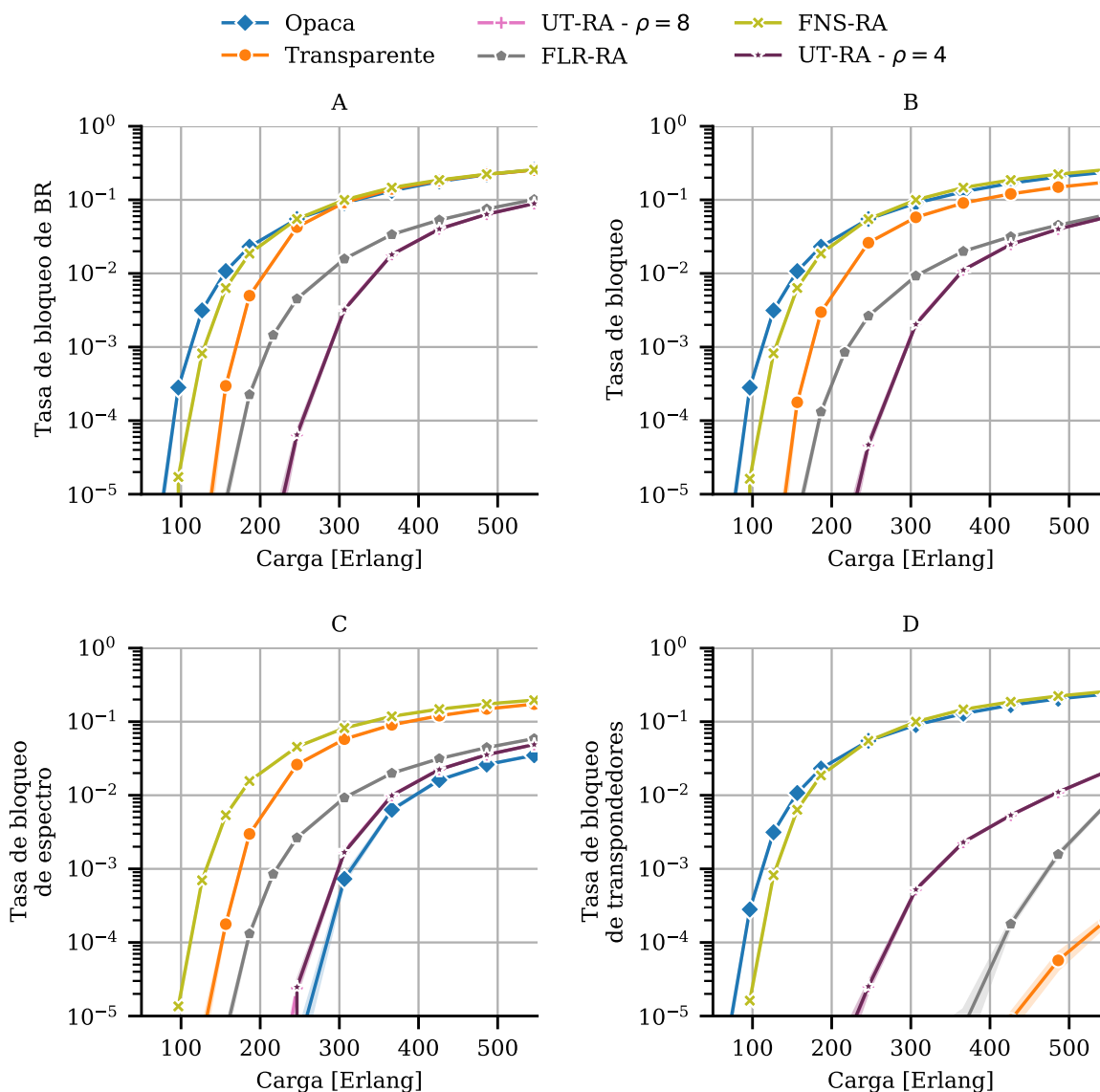


Figura 4.14: Resultados de simulación para el algoritmo UT-RA para la topología Europea COST266 bajo tráfico dinámico de tasa de bits mixta y 20 transpondedores por nodo por grado del nodo. A) tasa de bloqueo de *bitrate* vs carga de la red B) Tasa de bloqueo de demandas vs carga de la red C) Tasa de bloqueo de espectro vs carga de la red, D) Tasa de bloqueo de transpondedores vs carga de la red.

funcionamiento interno. El algoritmo FNS-RA busca aumentar la longitud de una transmisión con la mayor modulación posible hasta encontrar bloqueo, por esta razón la tasa de bloqueo de espectro para la estrategia FNS-RA no es representativa del bloqueo real. El comportamiento adaptativo del algoritmo UT-RA permite balancear el bloqueo por falta de espectro con el bloqueo por falta de transpondedores. Esto puede observarse en el hecho de que posee una baja tasa de

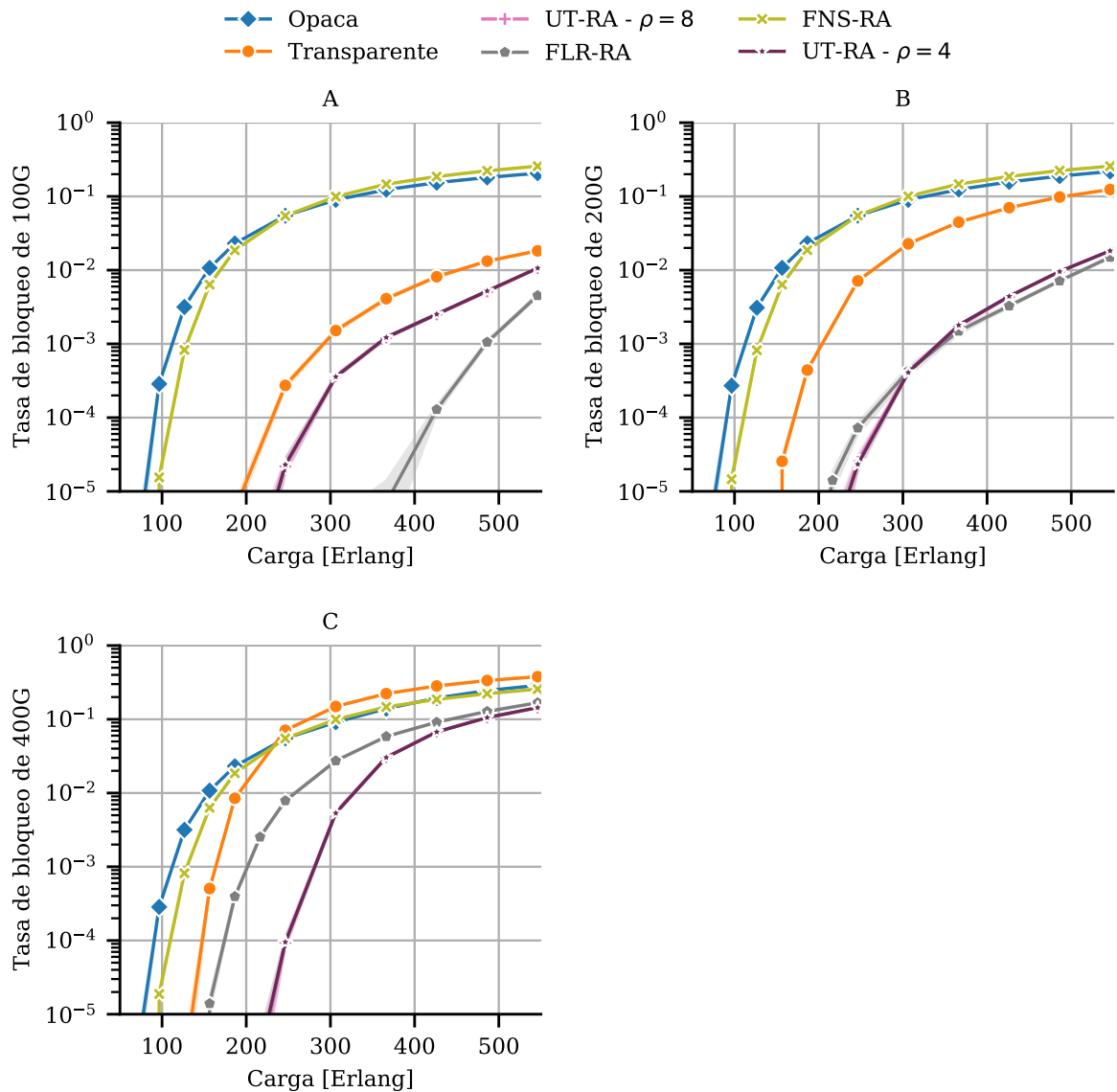


Figura 4.15: Resultados de simulación para el algoritmo UT-RA para la topología Europea COST266 bajo tráfico dinámico de tasa de bits mixta y 20 transpondedores por nodo por grado del nodo. A) Tasa de bloqueo de demandas de 100G vs carga de la red, B) Tasa de bloqueo de demandas de 200G vs carga de la red. C) Tasa de bloqueo de demandas de 400G vs carga de la red.

bloqueo tanto en términos de *slots* de espectro como de transpondedores.

La estrategia UT-RA permite balancear la utilización de espectro y transpondedores en los sucesivos aprovisionamientos de demandas, esto genera que la tasa de bloqueo por espectro y por transpondedores se vea balanceada minimizando así la tasa de bloqueo general.

En la Figura 4.15 mostramos la tasa de bloqueo para demandas de 100G, 200G y 400G. Las

estrategias *Opaca* y FNS-RA tienen el peor rendimiento en los tres casos. Ambas estrategias tienden a usar opciones altamente regeneradas. Por otro lado, la estrategia *Transparente* que nunca usa regeneración tiende a beneficiar las demandas de 100G sobre las demandas de 200G y 400G. Las demandas de 100G requieren menos *slots* de espectro por enlace que las demandas de 200G y 400G. A medida que las *slots* de espectro se convierten en un recurso escaso, las demandas que requieren menos *slots* de espectro tienen más probabilidades de ser aceptadas. Algo similar sucede con la estrategia FLR-RA. Esta estrategia funciona mejor que todas las demás en términos de tasa de bloqueo de demandas de 100G. Sin embargo, una demanda de 100G es mucho más probable que sea aceptada que una demanda de 200G o 400G usando esta estrategia. La estrategia basada en la utilización UT-RA es más justa entre las diferentes tasas de transferencia. Incluso si la tasa de bloqueo de demandas de 100G es mucho más alta que la obtenida con FLR-RA, esta penalización permite un mejor desempeño en términos de bloqueo de demandas de 400G.

La estrategia UT-RA incorpora las características de la demanda en la parametrización de la región del campo de soluciones preferido, permitiendo que un comportamiento justo entre demandas con diferentes tasas de transferencia.

Para el mismo escenario, mostramos la utilización del espectro, la utilización de transpondedores, la longitud media de la ruta por demanda y la cantidad de saltos promedio por demanda frente a la carga de la red en la Figura 4.16. Se puede ver que la longitud media de la ruta disminuye ampliamente con el aumento de carga para las estrategias *Transparente* y FNS-RA. Esto significa que en ambos casos es más probable que las demandas con rutas más largas se bloqueen a medida que aumenta la carga. Este es un fenómeno no deseado que tiene mucho menos impacto en las estrategias *Opaca*, FLR-RA y UT-RA. En la Figura 4.16-D se puede apreciar que la disminución de la longitud promedio va de la mano de la disminución de la cantidad de saltos promedio. Esto muestra que el bloqueo es principalmente por falta de continuidad en el espectro que por falta de espectro. Esto también puede reforzarse al analizar la Figura 4.16-A donde se ve que la utilización global de espectro no supera el 60% en ningún caso para la estrategia *Transparente*.

Al comparar la utilización del espectro y la utilización de transpondedores, las Figuras 4.16-A/B, se puede observar que las estrategias *Opaca* y FNS-RA hacen un uso intensivo de los transpondedores y siempre ahorran espectro. Por otro lado, las estrategias *Transparente* y FLR-RA tienden a usar mucho espectro y pocos transpondedores. Finalmente, el algoritmo UT-RA siempre está en el medio. Esto sucede debido a la capacidad de este algoritmo para compensar el uso del espectro y el transpondedor. Estos valores de utilización son generales de toda la red, es por esto que la utilización de espectro no coincide con la utilización de transpondedores. Ya que si bien la estrategia UT-RA compensa entre transpondedores y espectro en base a la utilización, lo hace en base a la utilización a nivel de ruta.

En la Figura 4.17 mostramos la proporción de formatos de modulación utilizados versus la

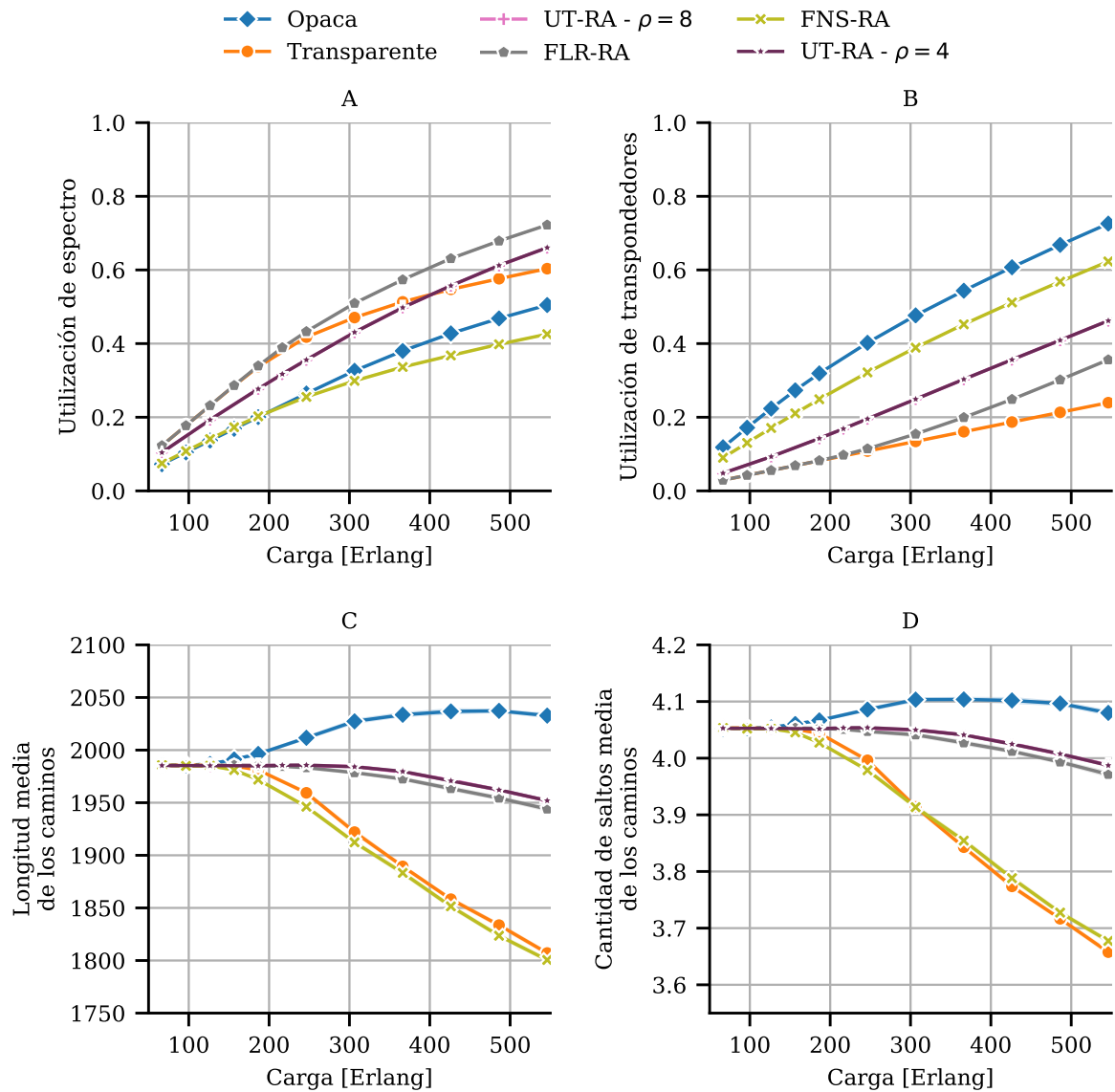


Figura 4.16: Resultados de simulación para el algoritmo UT-RA para la topología Europea COST266 bajo tráfico dinámico de tasa de bits mixta y 20 transpondedores por nodo por grado del nodo. A) Utilización de espectro vs carga de la red, B) Utilización de transpondedores vs carga de la red, C) Longitud media de los caminos de las demandas aceptadas vs carga de la red, D) Cantidad de saltos promedio de los caminos de las demandas aceptadas vs carga de la red.

carga de la red para las estrategias *Transparente*, *Opaca*, FLR-RA, FNS-RA y UT-RA. Analicemos en primer lugar el caso transparente, la modulación preponderante es 16QAM ocupando el 50% de las conexiones, luego sigue 8QAM con un 30% de las conexiones y los otros formatos con una menor proporción. Lo interesante aquí es que las proporciones se modifican poco con la carga, únicamente se puede observar un leve incremento en la proporción de 16QAM en detrimento de la proporción de 8QAM. Esto se debe a que, como ya vimos anteriormente, cuando se utiliza la estrategia *Transparente* las demandas con caminos más largos se ven más bloqueadas que aquellas con caminos más cortos. Caminos más largos implican formatos de modulación más bajos, es por esto que al aumentar la carga aquellos caminos que utilizan 8QAM se ven más afectados que aquellos que utilizan 16QAM.

El caso *Opaco* muestra un comportamiento muy diferente, las modulaciones preponderantes en este caso son 32QAM y 64QAM que entre las dos representan más del 80% de las conexiones. En este caso se ve que las proporciones se mantienen con excepción de una disminución de 64QAM acompañada de un aumento de 16QAM. Esto se debe principalmente a que al estar limitados los transpondedores, al aumentar la carga la probabilidad de poder regenerar en todos los saltos disminuye. Generando que se tengan que utilizar conexiones transparentes más largas y de ahí que no se pueda utilizar 64QAM y en su lugar se utilicen 16QAM y 32QAM.

Por su parte la estrategia FLR-RA muestra un comportamiento muy similar al *Transparente* para baja carga. Sin embargo difiere bastante para altas cargas, en donde se puede observar una fuerte reducción de la proporción de conexiones con 8QAM y un aumento de las modulaciones 32QAM y 64QAM. Esto se debe a que a medida que la carga aumenta, la estrategia FLR-RA empieza a utilizar regeneradores acortando las distancias y permitiendo la utilización de formatos de mayor eficiencia espectral.

El algoritmo FNS-RA presenta una gran preponderancia del formato de modulación 32QAM que representa más del 60% de las conexiones, seguido por el formato 64QAM con un 30% de las conexiones. Esto se debe al uso intensivo de la regeneración que hace este algoritmo. La principal diferencia con respecto al caso *Opaco* es que esta estrategia utiliza más conexiones con 32QAM en detrimento de las conexiones con 64QAM. La estrategia *Opaca* utiliza regeneración en cada nodo donde haya transpondedores disponibles, incluso en los casos en donde esto no genera una ganancia en términos de *slots*. En cambio FNS-RA solo utilizará un regenerador en caso de no poder mantener el formato de modulación.

El algoritmo propuesto UT-RA le da mayor preponderancia a las modulaciones 32QAM y 16QAM con aproximadamente un 50% y un 25% respectivamente. Las modulaciones 8QAM y 64QAM también están presentes con un 10% cada una aproximadamente. Esta configuración de proporciones no se corresponde ni con el caso *Transparente* ni con el caso *Opaco*. Mas bien parece una combinación de ambos, donde para el *Transparente* la modulación más utilizada es 16QAM y para el *Opaco* la más utilizada es 32QAM. Al aumentar la carga la proporción del formato de modulación 32QAM disminuye levemente al igual que 8QAM mientras que el formato

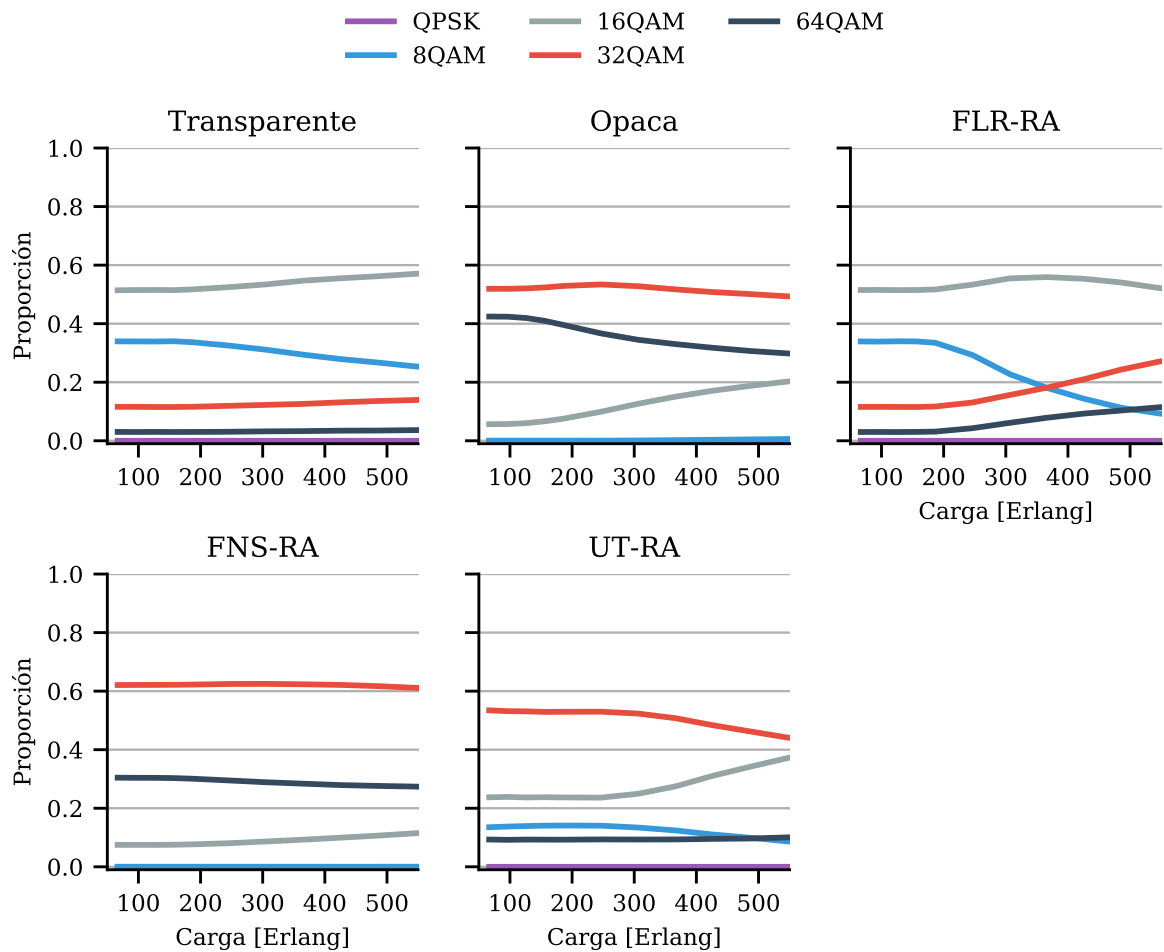


Figura 4.17: Resultados de simulación para el algoritmo UT-RA para la topología Europea COST266 bajo tráfico dinámico de tasa de bits mixta y 20 transpondedores por nodo por grado del nodo. Proporción de modulaciones vs Carga de la red para las estrategias *Transparente*, *Opaca*, *FLR-RA*, *FNS-RA* y *UT-RA*.

16QAM aumenta levemente su valor. Esto se debe principalmente al gran aumento del bloqueo de transpondedores que sufre la estrategia con el aumento de la carga que conlleva una disminución de la utilización de los formatos de modulación de mayor orden.

El principal beneficio del algoritmo UT-RA es que tiene en cuenta el estado actual de los recursos para realizar la selección de opciones sobre el conjunto de Pareto. Esta capacidad tiene un alto impacto en la probabilidad de bloqueo cuando se limita el número de transpondedores por nodo. Para mostrar esto, mostramos la tasa de bloqueo de *bitrate* versus el límite del transpondedores (Transpondedores por nodo por grado de nodo) en cuatro condiciones de carga, 250 y 310 Erlang, en la Figura 4.18. Como se puede ver, el algoritmo UT-RA siempre obtiene el mejor desempeño en términos de tasa de bloqueo. La estrategia *Transparente* obtiene una mejora

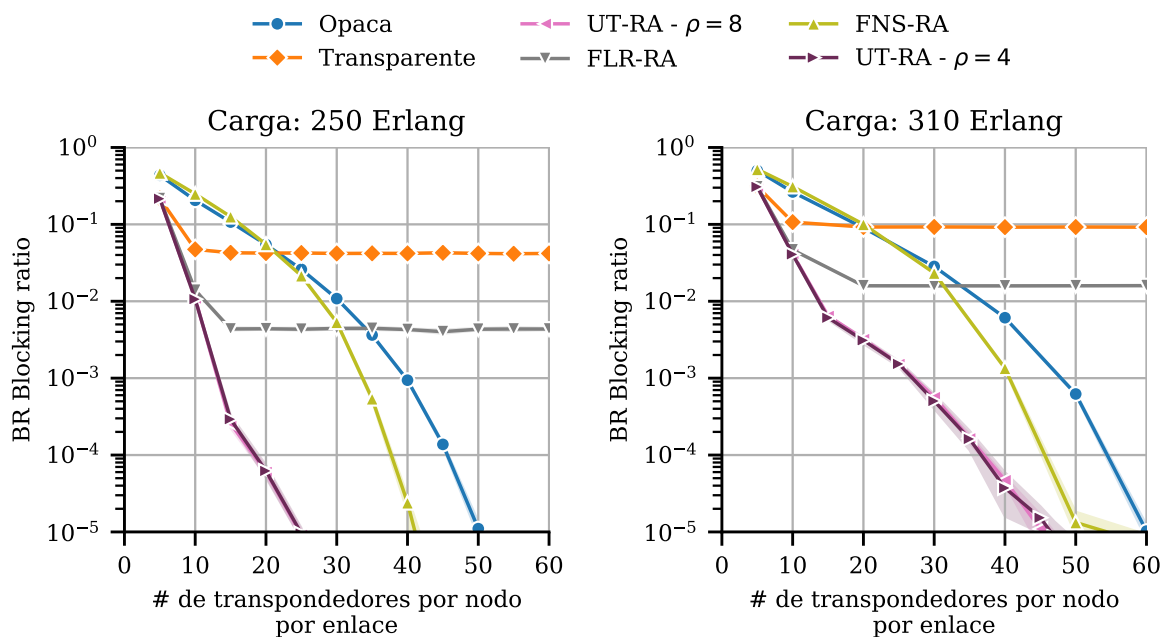


Figura 4.18: Resultados de simulación para el algoritmo UT-RA para la topología Europea COST266 bajo tráfico dinámico de tasa de bits mixta y transpondedores por nodo por grado del nodo limitados. Tasa de bloqueo de *bitrate* vs límite de transpondedores para cuatro cargas 250, 310 Erlang.

cuando se pasa de 5 a 10 transpondedores por nodo por enlace pero luego se estabiliza. Esto tiene sentido porque la estrategia *Transparente* solo usa transpondedores para la transmisión, por lo tanto, el efecto de bloqueo dominante es la falta de espectro. Algo similar sucede con el FLR-RA, donde la relación de bloqueo se reduce cuando se pasa de 5 a 15 transpondedores por nodo por enlace, pero luego permanece prácticamente igual independientemente del límite. Para un superior a 15, el bloqueo de espectro es dominante para FLR-RA. Esto no sucede con las estrategias *Opaca* y FNS-RA donde el efecto de bloqueo dominante siempre es la falta de transpondedores. En esos casos, se puede ver que la tasa de bloqueo siempre disminuye al menos en el rango que estamos utilizando para el límite de transpondedores. Eventualmente, para un límite de transpondedores muy alto, todas las estrategias quedarían bloqueadas principalmente por el espectro. Finalmente, el algoritmo UT-RA tiene una ganancia en términos de tasa de bloqueo a medida que aumenta el límite de transpondedores. Esto sucede porque este algoritmo siempre aprovecha los recursos disponibles. A medida que aumenta la carga, la ganancia obtenida disminuye ya que las opciones disponibles se reducen debido a la falta de recursos, sin embargo, todavía hay ganancia.

La estrategia UT-RA tiene en cuenta los recursos disponibles para determinar la región de opciones preferidas a partir del conjunto de Pareto, esto le permite minimizar la tasa e bloqueo

independientemente de la cantidad de transpondedores disponibles. Cuando la cantidad de transpondedores disponibles es muy baja el algoritmo se comporta de forma similar al caso Transparente, cuando hay transpondedores ilimitados el algoritmo permite equiparar al caso Opaco y para cualquier situación intermedia minimizar la tasa de bloqueo.

4.5.2.1 Otras topologías de red

Para contrastar los resultados, realizamos simulaciones para otras dos topologías de red. La topología US24 de Estados Unidos de 24 nodos y 43 enlaces que se muestra en la Figura 4.9 y la topología Argentina CORE de 29 nodos y 55 enlaces que se muestra en la Figura 4.9. En ambos casos consideramos toda la banda C (4 THz) dividida en 320 *slots* de espectro de 12.5 GHz, un *slot* vacío como banda de guarda entre los supercanales adyacentes. Un transpondedor elástico que admite BPSK, QPSK, (8, 16, 32, 64)-QAM ($\eta \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$), 25 % FEC sobre un BER = $1e-2$ ($H = 25$), y se supone una tasa de símbolos máxima de 50 Gbaud / s ($B = 50$). Todos los impedimentos físicos se consideran utilizando el modelo GN [57].

Consideramos demandas de tráfico dinámico con diferentes tasas de transferencia de 100 Gb/s, 200 Gb/s y 400 Gb/s. Los tiempos de llegada y mantenimiento de la demanda siguen procesos independientes de Poisson. El origen, el destino y la tasa de bits se seleccionan aleatoriamente mediante distribuciones uniformes. Todos los resultados mostrados se obtuvieron ejecutando 40 simulaciones independientes con 40 semillas diferentes y 500000 llegadas de demanda cada una.

En la Figura 4.19 mostramos los resultados para la topología US24, tasa de bloqueo de *bitrate*, cantidad de saltos promedio por demanda, utilización de espectro y de transpondedores vs la carga de la red. En la Figura 4.20 mostramos los mismos resultados pero para la red Argentina CORE.

En ambas topologías de red, la estrategia basada en la utilización permite obtener mejores resultados que las otras estrategias en términos de tasa de bloqueo. Y de forma similar a lo que sucede en la topología COST266, la utilización global de transpondedores y espectro de esta estrategia se encuentra en un punto intermedio entre los resultados de *Transparente* y *Opaca*. La primera topología parece estar más ajustada que la segunda, para la misma carga, la relación de bloqueo es mucho más alta. Sin embargo, en otra escala, el comportamiento es similar, ya que el FLR-RA obtiene mejores resultados que FNS-RA, *Opaca* y *Transparente* mientras que UT-RA presenta un mejor desempeño mejor que todas las demás. En estas dos topologías se da el mismo efecto que en la COST266 donde la utilización de transpondedores siempre va por debajo de la utilización de espectro para la estrategia UT-RA. Esto se debe, como ya mencionamos antes, a que las medidas de utilización utilizadas por el algoritmo son locales al camino elegido. Para trabajos futuros se podría investigar la posibilidad de utilizar métricas globales para el aprovisionamiento. En estas dos topologías se repite el efecto de disminución de la cantidad de saltos promedio de los caminos de las demandas aceptadas con el incremento de la carga. Presentando un efecto más marcado para la topología US24 debido principalmente a las altas tasas de bloqueo. Para estas

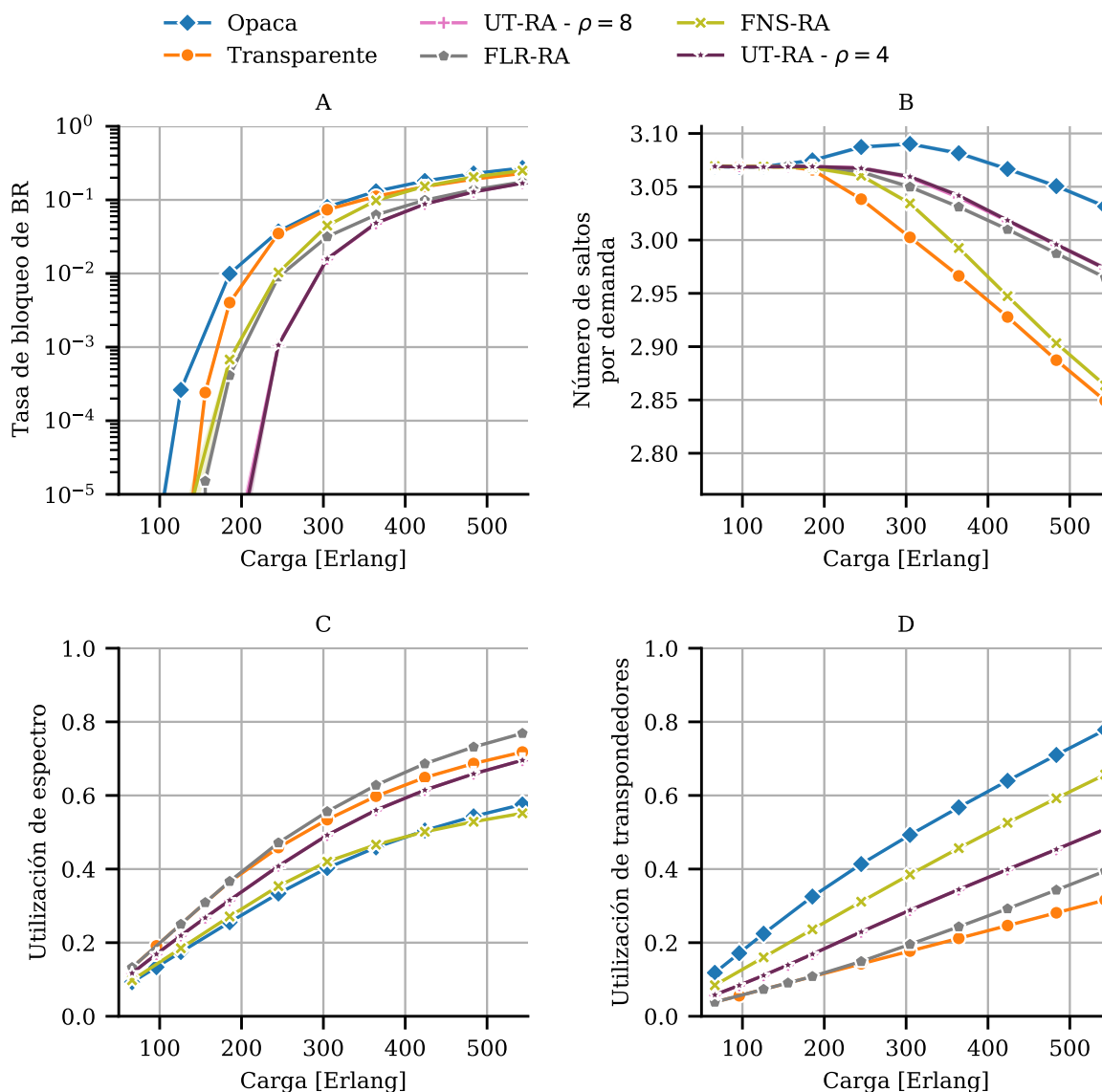


Figura 4.19: Resultados de simulación para el algoritmo UT-RA para la topología Estadounidense US24 bajo tráfico dinámico de tasa de bits mixta y 20 transpondedores por nodo por grado del nodo. A) Tasa de bloqueo de *bitrate* vs carga de la red, B) Cantidad de saltos promedio por demanda vs carga de la red, C) Utilización de espectro vs carga de la red, D) Utilización de espectro vs carga de transpondedores.

dos topologías la estrategia UT-RA permite, al igual que en la topología COST266, minimizar este efecto comparando con el caso *Transparente*.

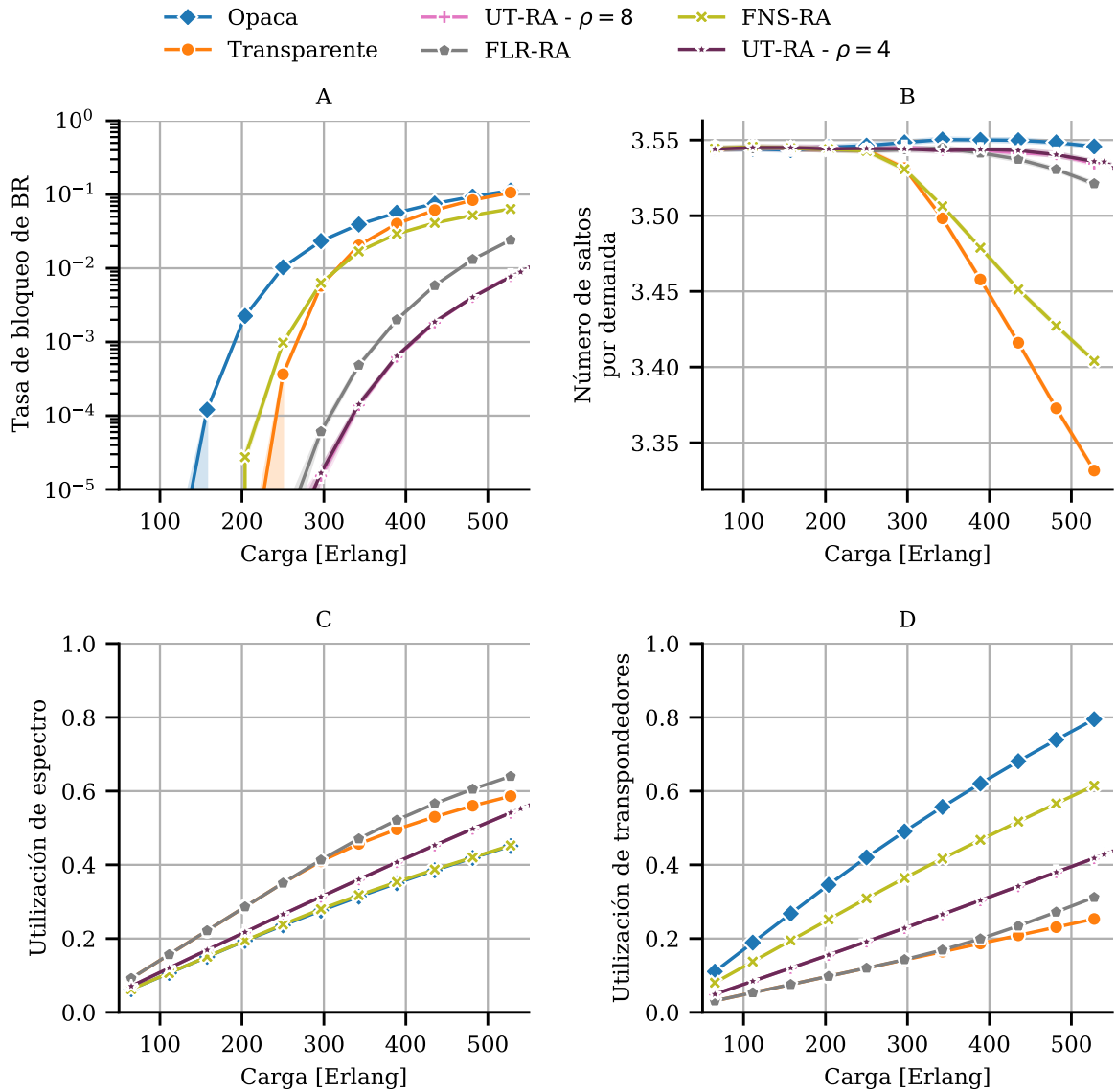


Figura 4.20: Resultados de simulación para el algoritmo UT-RA para la topología Argentina ARG-CORE bajo tráfico dinámico de tasa de bits mixta y 20 transpondedores por nodo por grado del nodo. A) Tasa de bloqueo de *bitrate* vs carga de la red, B) Cantidad de saltos promedio por demanda vs carga de la red, C) Utilización de espectro vs carga de la red, D) Utilización de espectro vs carga de transpondedores.

4.5.3 Consideraciones de complejidad

El mayor costo computacional de estos algoritmos está en la asignación de espectro. Todos los algoritmos utilizan la misma subrutina de asignación de espectro. Entonces, la complejidad de los diferentes algoritmos puede considerarse como el número de veces que llaman a la subrutina

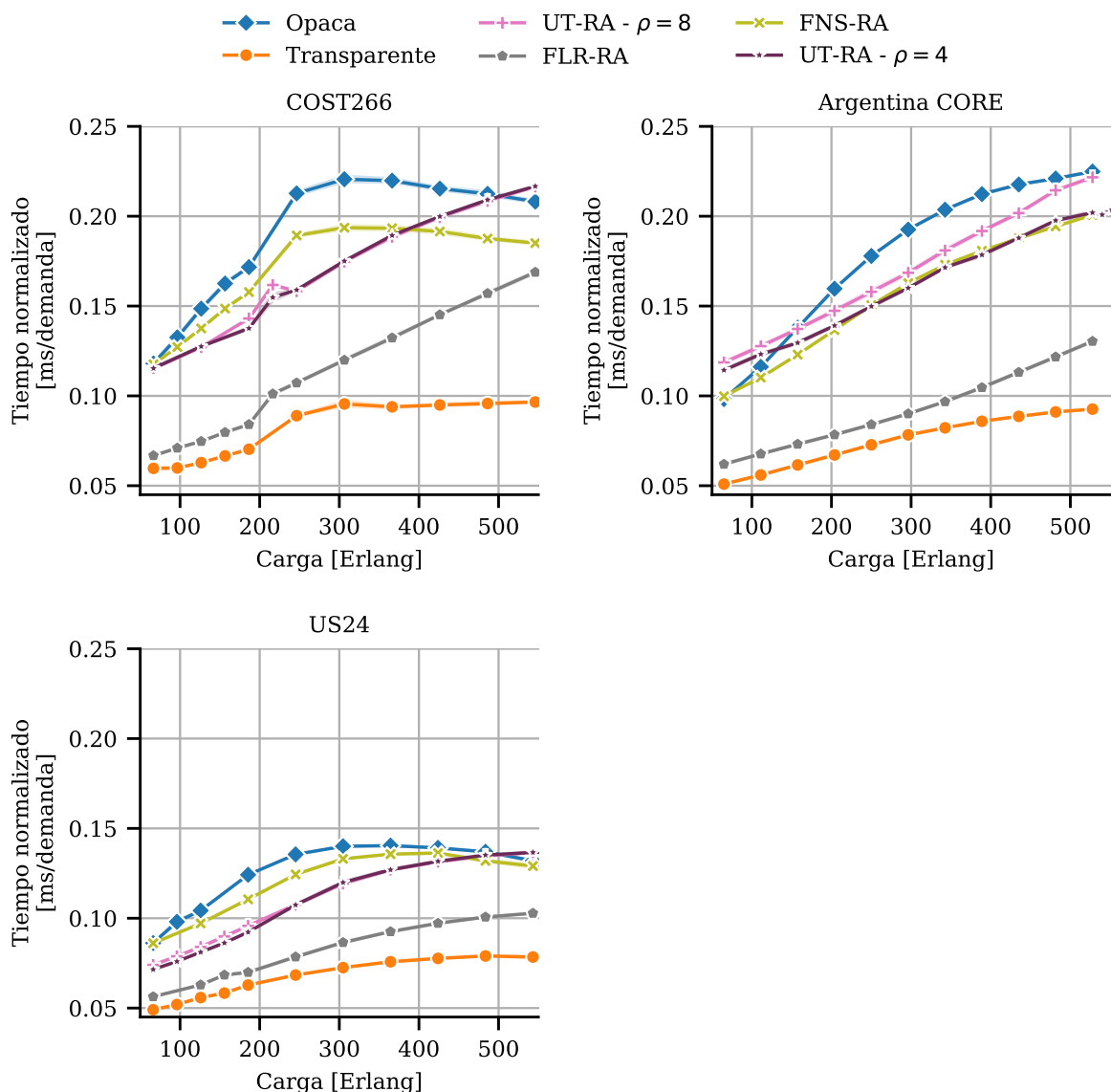


Figura 4.21: Resultados de simulación para el algoritmo UT-RA para las topologías COST266, US24 y ARG-CORE bajo tráfico dinámico de tasa de bits mixta y 20 transpondedores por nodo por grado del nodo. Tiempo de cómputo normalizado en ms por demanda vs carga.

de asignación de espectro.

Esta subrutina evalúa tanto la disponibilidad del espectro como de transpondedores a lo largo de un camino o subcamino. Y, si no hay bloqueo de espectro/transpondedor, determina la mejor asignación de espectro.

La complejidad del peor caso del algoritmo UT-RA está dominada por la cantidad de opciones para evaluar que de hecho es combinatoria. Suponiendo que la complejidad de la asignación del

espectro es constante. Sea H el número de saltos en la ruta, entonces la complejidad del algoritmo basado en la utilización es $O(2^{H-1}H)$. Donde 2^{H-1} es el número de opciones de regeneración y H el número de llamadas a la asignación de espectro por opción evaluada. Como el número de nodos incluidos en la base de la combinación está acotado por ρ , entonces la complejidad también está acotada: $O(2^\rho H)$.

Sin embargo, la complejidad del peor caso del algoritmo UT-RA está muy sobredimensionada. El número real de opciones que se evalúan tiende a ser mucho menor ya que algunas de las opciones pueden estar bloqueadas por espectro o transpondedores. Los requisitos de cada opción se pueden calcular previamente y las opciones que no tienen suficientes recursos se descartan casi sin costo computacional. Además, el número de llamadas a la asignación de espectro suele ser mucho menor que H , como en el peor de los casos. Solo hay una opción con $H - 1$ regeneradores. El número promedio de regeneradores en una opción aleatoria será un número entre 0 y $H - 1$.

Mientras que para el FLR-RA y el FNS-RA la complejidad del peor caso es $O(2H)$. El mejor caso tiene una complejidad de $O(H)$, por lo tanto, la complejidad promedio estará entre $O(H)$ y $O(2H)$. Con FLR-RA cerca de $O(H)$ y FNS-RA cerca de $O(2H)$.

En la Figura 4.21 mostramos el tiempo de cómputo normalizado en ms por demanda versus a la Carga para las tres topologías. En este caso los resultados para la estrategia *Transparente* se pueden usar como base para las comparaciones ya que esta estrategia sólo llama a la rutina de asignación de espectro una única vez. Por otro lado, el caso *Opaco* llama a esta rutina aproximadamente una vez por salto, y por lo tanto el tiempo de cálculo requerido por demanda es mucho mayor, más del doble en todas las condiciones de carga. Tal como se esperaba la estrategia FLR-RA es la que presenta un mejor comportamiento en términos de tiempo de computación por demanda con excepción del *Transparente*. Esto se debe a que esta estrategia utiliza muy poca regeneración y por lo tanto llama a la rutina de asignación de espectro pocas veces por demanda. Por otra parte la estrategia FNS-RA presenta tiempos de cómputo cercanos al caso *Opaco*. Esto se debe a que esta estrategia tiende a utilizar opciones muy regeneradas, por lo tanto debe llamar a la asignación de espectro muchas veces por demanda. Lo más importante a apreciar en estos gráficos es el hecho de que la estrategia UT-RA, a pesar de poseer una complejidad teórica del peor caso mucho peor que las otras estrategias, en el caso práctico la posibilidad de eliminar opciones del conjunto de Pareto con antelación permite que los tiempos de cómputo sean comparables a los obtenidos con las otras estrategias. Incluso para muchos casos menores que los requeridos por la estrategia FNS-RA. Esto muestra la aplicabilidad técnica de esta estrategia, sumada a las ventajas mostradas en esta Sección.

En el caso de la topología Argentina CORE se puede apreciar el efecto del límite ρ al número de nodos a incluir regeneración en la estrategia UT-RA. Al utilizar un límite $\rho = 4$ obtenemos una disminución en los tiempos de cómputo promedio. Esta diferencia se puede apreciar en esta topología y en las otras no debido a que en esta existen caminos de mayor longitud y por lo tanto el efecto del límite tiene mayor predominancia. El efecto de este límite se podrá apreciar mejor

en los siguientes resultados donde analizamos el tiempo de cómputo en función de la longitud máxima de los caminos.

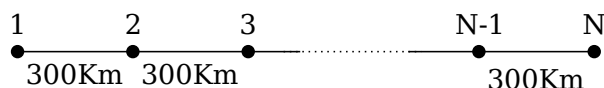


Figura 4.22: Topología utilizada para evaluar el efecto de la cantidad de saltos en el tiempo de cómputo. Red lineal con saltos de 300 km con $N = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11$ y 12 .

La complejidad de los algoritmos depende fundamentalmente de la cantidad de saltos de los caminos. Es por esto que evaluamos los algoritmos sobre una red lineal con 3,4,5,6,7,8,9,10,11 y 12 saltos de 300 km como se muestra en la Figura 4.22.

En la Figura 4.23 mostramos los tiempos normalizados de cómputo para las diferentes estrategias sobre la topología lineal para diferentes cantidades de nodos. Para cada topología se corrieron 300 simulaciones con cargas variando de 20 Erlang a 500 Erlang y 500000 arribos de demandas por simulación. Luego se descartaron todas aquellos resultados cuya tasa de bloqueo no estuviera en el rango $[0.01, 0.1]$. Todos los resultados que se muestran en esta figura corresponden a tasas de bloqueo en el rango $[0.01, 0.05]$. Para estos resultados mostramos en Figura 4.23-A el tiempo medio de cómputo normalizado y en Figura 4.23-B el tiempo máximo de cómputo normalizado. La estrategia *Transparente* siempre requiere el menor tiempo ya que llama una única vez a la rutina de asignación de espectro. Por su parte el algoritmo FLR-RA requiere tiempos de cómputo muy cercanos al caso *Transparente* ya que esta estrategia intenta minimizar el número de regeneradores por lo tanto también minimiza el número de llamadas a la asignación de espectro. La estrategia *Opaca* coloca regeneradores en todos los nodos intermedios donde existan transpondedores libres, es por esto que en la gran mayoría de los casos llamará $N - 1$ veces a la asignación de espectro, donde N es el número de nodos en la topología lineal. El algoritmo FNS-RA puede en el peor de los casos necesitar llamar a la rutina de asignación de espectro $2(N - 1)$ veces. Es por esto que los tiempos requeridos por esta estrategia están por encima del caso *Opaco*. Para la estrategia UT-RA mostramos dos casos con $\rho = 6$, $\rho = 7$ y $\rho = 8$ donde ρ es el número máximo de nodos con regeneración permitidos por demanda como se explicó en la Sección 4.4.6. Como cabe esperar los tres casos responden igual para $N < 8$ donde todas las opciones de regeneración cuentan con menos de 6 nodos intermedios. Sin embargo cuando la cantidad de saltos supera los 7 estos tres casos se separan. La estrategia UT-RA sin límite en el número de regeneradores tiene una complejidad exponencial, que es el comportamiento que se observa en la Figura 4.23 para $N < 8$ sin embargo el límite ρ permite modificar este comportamiento para N grande. Lo que se logra con el límite al número de puntos de regeneración es partir el comportamiento en dos, para caminos cortos la complejidad es exponencial con respecto al número de saltos sin embargo para caminos largos la complejidad es lineal a partir de cierto punto. Esto

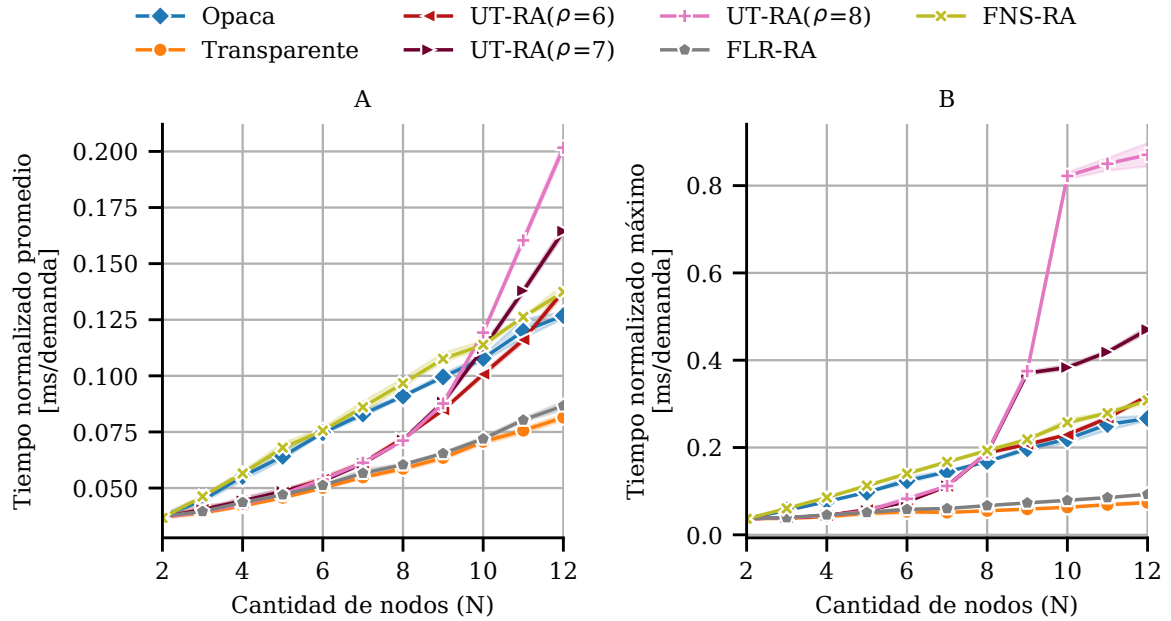


Figura 4.23: Resultados de simulación para tráfico dinámico de tasa mixta (100G,200G,400G) sobre topología lineal con 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11 y 12 nodos y saltos de 300 km, resultados para una tasa de bloqueo en el rango [0.01,0.05]. A) Tiempo normalizado medio de cómputo en ms/demanda versus el número de nodos en la topología. B) Tiempo normalizado máximo en ms/demanda versus el número de nodos en la topología.

es lo que se ve en esta figura, para $\rho = 6$ el comportamiento se vuelve lineal para $N > 7$, para $\rho = 7$ se vuelve lineal para $N > 8$ y para $\rho = 8$ se vuelve lineal para $N > 9$. Este parámetro ρ del algoritmo puede permitir limitar el tiempo de cómputo cuando sea necesario en presencia de caminos muy largos. De todas maneras, se puede apreciar que para caminos con menos de 12 saltos los tiempos de cómputo promedio son comparables a las otras estrategias. Consideramos que las ventajas del algoritmo UT-RA frente a las otras estrategias superan con creces los costos a nivel computacional.

En todos los resultados de las secciones anteriores informamos resultados obtenidos con $\rho = 8$ y $\rho = 4$. El objetivo de esto es mostrar que para estas tres topologías incluso utilizando un límite chico como es $\rho = 4$ se obtienen excelentes resultados. Lo que indica que el uso de este límite permite acotar la complejidad sin sacrificar calidad en los resultados.

El algoritmo UT-RA al contrario de FNS-RA y FLR-RA es fuertemente paralelizable, ya que cada opción de regeneración puede ser evaluada por separado. En este trabajo no se implementó paralelismo alguno por lo que aún si el algoritmo propuesto tiene una complejidad exponencial con el número de saltos, los tiempos de cómputo podrían reducirse en gran medida utilizando paralelismo.

4.6 Conclusiones

En este capítulo, analizamos el problema del aprovisionamiento de ruta translúcida en redes ópticas elásticas bajo tráfico dinámico. Presentamos dos estrategias que llamamos conscientes de los recursos: asignación de regeneradores basado en umbral de espectro (*Threshold Based Regenerator Assignment*) (TH-RA) y asignación de regeneradores basado en la utilización (*Utilization Based Regenerator Assignment*) (UT-RA) y comparamos su desempeño con estrategias clásicas agnósticas de los recursos *Transparente*, *Opaca*, asignación de regeneradores primero el mayor alcance (*First Longest Reach Regenerator Assignment*) (FLR-RA) y asignación de regeneradores primero la menor porción de espectro (*First Narrowest Spectrum Regenerator Assignment*) (FNS-RA).

La estrategia TH-RA permite explorar el conjunto de soluciones y seleccionar la mejor opción dependiendo de una umbral que puede entenderse como un presupuesto en términos de espectro. Mostramos las grandes ventajas que presenta esta estrategia en escenarios en donde el número de regeneradores por nodo no está limitado. En este tipo de escenarios el uso de transpondedores puede pensarse como un costo y el algoritmo TH-RA permite minimizar este costo dado un presupuesto en términos de *slots* de espectro.

En escenarios donde los transpondedores se encuentran desplegados en los nodos y son un recurso limitado, tiene más sentido pensar el problema como un problema de asignación de recursos en dos dimensiones. En un escenario de estas características se vuelve poco práctico determinar un umbral adecuado para el algoritmo TH-RA. Por esto propusimos un algoritmo que permite adaptarse al estado de la red y a los requerimientos de cada demanda llamado UT-RA. Este algoritmo permite obtener soluciones balanceadas al acotar el campo de soluciones (conjunto de Pareto) en función de la utilización de espectro y transpondedores y en función de los requerimientos de la demanda para luego seleccionar de ese conjunto acotado la solución que minimice el recurso más utilizado.

Comparamos las estrategias propuestas con soluciones clásicas como las transparentes y opacas, y con enfoques más avanzados utilizados en trabajos anteriores como son FNS-RA y FLR-RA. Mostramos que el algoritmo UT-RA permite encontrar mejores soluciones reduciendo fuertemente la probabilidad de bloqueo bajo diferentes escenarios de carga y de límite de transpondedores por nodo. Mostramos también que nuestro algoritmo permite ser más justo entre demandas de diferentes tipos.

Finalmente mostramos que los tiempos de cómputo de la estrategia UT-RA son comparables con los requeridos por las otras estrategias y que es posible acotar la complejidad del algoritmo manteniendo buenos resultados.

Los resultados mostrados en este capítulo se presentaron de forma parcial en la conferencia global de comunicaciones GLOBECOM 2018 en Diciembre de 2018 en el simposio de sistemas y redes ópticas.

ARQUITECTURA DE TRANSPONEDORES

5.1 Introducción

La arquitectura de redes ópticas elásticas (EON) permite un uso más eficiente de los recursos en comparación con las redes WDM/DWDM tradicionales [27, 38]. Por un lado, las conexiones ópticas se pueden asignar utilizando menos recursos de espectro gracias a la grilla flexible flex-grid de 12.5 GHz en lugar de las grillas fijas de 50/100 GHz [13, 71]. Por otro lado, los transpondedores de ancho de banda variable (Bandwidth Variable Transponder, BVT) que admiten múltiples velocidades de transmisión, formatos de modulación y portadoras pueden aumentar significativamente la eficiencia espectral de las conexiones ópticas [48]. En el capítulo anterior mostramos en detalle las ventajas que presenta la utilización de regeneración en este tipo de redes, donde es posible disminuir significativamente las probabilidades de bloqueo. Recientemente se han propuesto los transpondedores segmentables de ancho de banda variable (Sliceable Bandwidth Variable Transponder, SBVT) para disminuir la cantidad de transpondedores, que se ha convertido en un costo considerable en las redes de hoy en día [25, 48, 64]. Estos transpondedores tienen la capacidad de soportar múltiples flujos ópticos en una sola arquitectura de transpondedor, permitiendo compartir y reutilizar los recursos disponibles, potencialmente reduciendo la cantidad y el costo de los transpondedores.

En contraste con lo que sucede en las redes WDM/DWDM tradicionales, las redes EON presentan una relación de compromiso entre el uso de regeneración flexible y el uso de slots de espectro [31, 41, 43, 74]. De hecho, los regeneradores flexibles se pueden usar no solo para disminuir la probabilidad de bloqueo, como en las redes WDM/DWDM tradicionales, sino también para aumentar la eficiencia del espectro. Sin embargo, la regeneración flexible asume el uso de BVT para lograr esta ganancia, lo que aumenta la cantidad de transpondedores en la red.

Como resultado, el uso de SBVTs, en lugar de BVTs, puede proporcionar los beneficios de la regeneración flexible requiriendo menos transpondedores.

En este capítulo analizamos los beneficios potenciales de utilizar SBVTs cuando las demandas se aprovisionan utilizando rutas translúcidas. Proponemos una estrategia de aprovisionamiento que permite reducir la probabilidad de bloqueo a un costo comparable con el costo de un aprovisionamiento Transparente. Finalmente presentamos una adaptación del algoritmo UT-RA para evaluar las ventajas de usar SBVTs.

5.1.1 Trabajos relacionados

En las redes WDM/DWDM, la regeneración se utiliza principalmente para compensar los problemas relacionados con la longitud de transmisión o para permitir la conversión de longitud de onda. Además, la regeneración no tiene impacto en la eficiencia del espectro, ya que todas las transmisiones utilizan un canal completo de 50/100 GHz. En este contexto, los trabajos anteriores se han centrado en la colocación de regeneración [7, 55]. Este problema consiste en seleccionar en qué nodos está habilitada la regeneración. Este problema también se estudió para las redes EON en [11, 79, 80] pero con el mismo enfoque, seleccionar de antemano qué nodos admiten la regeneración para superar el deterioro físico.

En [81] se estudió el problema de enrutamiento translúcido que tiene en cuenta los impedimentos físicos para redes EON. La regeneración flexible se modeló considerando diferentes formatos de modulación soportados por regeneradores, pero eligiendo de antemano la ubicación de los puntos de regeneración, por lo tanto el aprovisionamiento no tiene control sobre los mismos. Los resultados mostraron que la regeneración puede mejorar el rendimiento de bloqueo. En [40] se estudió por primera vez la relación de compromiso entre la ubicación de la regeneración y el uso del espectro en los EON. Los resultados demostraron que existe una relación no lineal entre el uso general del espectro y el uso general de la regeneración. Además, los autores demostraron que hay una reducción considerable del uso del espectro en EON cuando se colocan los regeneradores.

En [41] se estudiaron las mejoras de rendimiento obtenidas por la regeneración y la conversión de modulación en redes EON translúcidas. Los autores propusieron un modelo de regenerador que utiliza transpondedores adicionales para aumentar el número de portadores en secciones transparentes de las rutas translúcidas. Mostraron que una ruta translúcida con más puntos de regeneración puede usar menos transpondedores que una opción menos regenerada. Esto sucede debido a la compresión de espectro que permiten los formatos de modulación de alto orden. Se utilizó un enfoque de optimización y los resultados mostraron que se pueden lograr ganancias al explotar la regeneración con conversión de modulación. Recientemente, el problema de la asignación de ruta, espectro, modulación y regeneración (RSMRA) se ha estudiado para el aprovisionamiento no protegido en [14, 15, 18, 19, 26, 31, 43, 70] y para el aprovisionamiento protegido en [36]. Sin embargo, ninguno de estos trabajos contempla el uso de SBVTs.

La arquitectura de transpondedores segmentables (SBVT) fue propuesta por primera vez en

2015 por Sambo et al. en [63]. Luego fue descrita con mayor detalle en [20, 25, 48, 64]. En un trabajo muy reciente Nadal et al. proponen un transpondedor SBVT para redes definidas por software [53]. Todos estos trabajos están enfocados en la arquitectura sin embargo ninguno de estos trabajos analiza el impacto de estas arquitecturas en el aprovisionamiento.

El objetivo principal de este capítulo estudiar por primera vez el impacto de los transpondedores SBVT en el problema de asignación de ruta, espectro, modulación y regeneración.

5.1.2 Nuestra Contribución

El aprovisionamiento translúcido en redes EON consiste en seleccionar una ruta y los nodos intermedios donde se realiza la regeneración. Los regeneradores dividen el camino en subcaminos transparentes. La continuidad y la contigüidad del espectro se deben satisfacer en cada una de los subcaminos transparentes. En las redes EON, la regeneración se puede utilizar para ahorrar recursos de espectro. En [15, 18, 19, 26, 31, 40, 41] se estudió la relación entre el espectro y la regeneración. Estos trabajos modelaron los transpondedores como transpondedores fijos o como transpondedores de ancho de banda variable (BVTs). Dado que ninguno de los trabajos anteriores analizó el impacto de los SBVT en el aprovisionamiento translúcido en EON, nos centramos en este problema. Analizamos las posibles ventajas con algunos ejemplos simples y luego proponemos una estrategia que intenta aprovechar estas ventajas. Analizamos el comportamiento de dicha estrategia en las tres topologías de ejemplo. Finalmente, adaptamos la estrategia UT-RA propuesta en el capítulo anterior para aprovechar los SBVT.

5.1.3 Organización del resto del capítulo

En este capítulo, al igual que en el Capítulo 4 analizamos el problema de aprovisionamiento en redes EON. El objetivo es, dada una demanda, asignar una ruta, puntos de regeneración, formatos de modulación y slots de espectro. El objetivo principal en este capítulo es evaluar las potenciales ventajas de utilizar SBVTs. Para ello contemplamos la probabilidad de bloqueo y el costo del aprovisionamiento sobre redes EON con transpondedores BVT y SBVT. A su vez, evaluamos el impacto de los SBVT en el uso de regeneración.

Los SBVTs permiten la regeneración compartida, en la Sección 5.2 mostramos con dos ejemplos simples cómo la regeneración compartida a veces puede mejorar la eficiencia del espectro incluso sin usar transpondedores adicionales.

En la Sección 5.3 presentamos el modelo utilizado para los nodos, los enlaces, los transpondedores y para la regeneración compartida.

En la Sección 5.4 presentamos las estrategias de aprovisionamiento evaluadas y en la Sección 5.5 mostramos resultados de simulación bajo diferentes condiciones.

5.2 Regeneración compartida

La adopción de los SBVTs como arquitectura de transponedor de próxima generación para las redes EON introduce una nueva dimensión de flexibilidad que debe tenerse en cuenta en el proceso de aprovisionamiento. El aprovisionamiento de rutas translúcidas consiste en encontrar la mejor opción de regeneración, en seleccionar los formatos de modulación y asignar slots de espectro para cada subcamino transparente. Una opción de regeneración es un conjunto de nodos intermedios donde tiene lugar la regeneración flexible. Un regenerador flexible puede pensarse como dos transponedores en una configuración de espalda con espalda. En este contexto, el tipo de transponedor define las capacidades del regenerador. Cuando se utilizan transponedores no segmentables, existe un compromiso entre la utilización del espectro y el costo relacionado con la regeneración [14, 15, 18, 19, 26, 31, 41]. Se debe asumir un costo adicional debido al despliegue de transponedores dedicados a la regeneración. Sin embargo, cuando se usan SBVTs, se comparten transponedores entre varios flujos, definiendo un nuevo problema de optimización

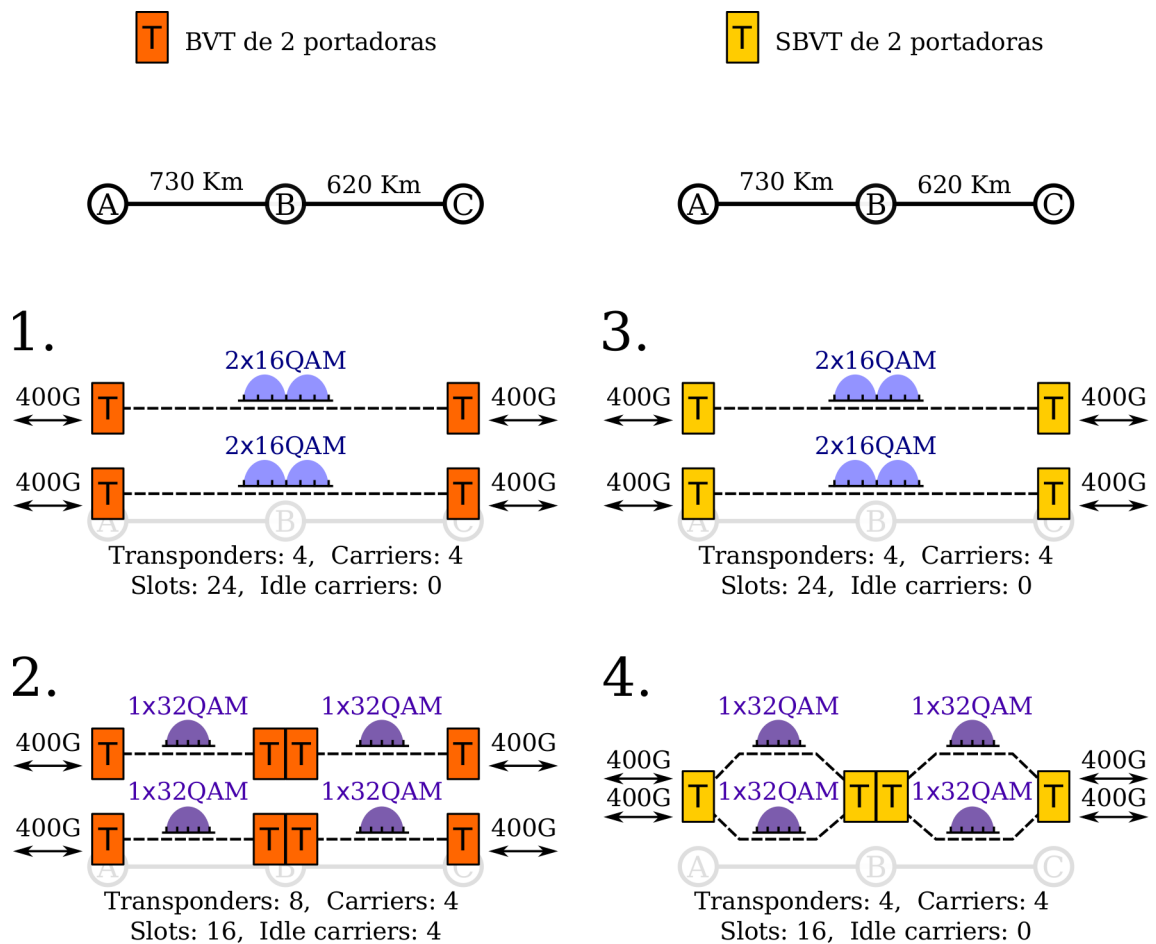


Figura 5.1: Aprovisionamiento de dos demandas de 400 Gb/s sobre un único camino de dos saltos utilizando BVTs y SBVTs, sin y con regeneración.

de la regeneración compartida. De hecho, en algunas situaciones, la regeneración compartida se puede utilizar para mejorar la eficiencia del espectro utilizando la misma cantidad de recursos que los utilizados en una transmisión transparente, como se detalla a continuación.

En el ejemplo que se muestra en la Figura 5.1, dos demandas de 400 Gbit/s deben provisionarse sobre una ruta de dos saltos. Ambas demandas comparten el nodo origen (A) y el nodo destino (C). El primer salto es de 730 km y el segundo es de 620 km. Para la longitud total del trayecto de 1350 km, se necesitan dos portadoras con doble polarización 16QAM para transportar los 400 Gbit/s. Los detalles sobre el modelo utilizado para obtener estos valores se muestran en la Sección 5.3. Si se asume un BVT de dos portadoras, se necesitan 4 transpondedores. La cantidad total de portadoras es de 4 y se utilizan 24 slots en total ($3 \text{ slots/portador} \times 2 \text{ portadoras/conexión} \times 2 \text{ conexiones} \times 2 \text{ saltos}$). Si se usan regeneradores en el nodo intermedio (B), se necesitan 8 transpondedores, cuatro para la transmisión en los nodos de los extremos y cuatro para la regeneración. Mientras tanto, la cantidad de slots de espectro se reduce a 16. Como cada transpondedor tiene recursos para gestionar 2 portadoras, pero solo se utiliza una en cada salto, hay 4 portadoras que quedan inactivas. Estos recursos inactivos no pueden usarse para otras demandas si los transpondedores en el caso de los BVTs.

Si se asumen SBVTs de dos portadoras como se muestra en la Figura 5.1, cuando se usan dos conexiones transparentes no hay diferencia con el caso anterior ya que ambas conexiones requieren dos portadores. Sin embargo, en la opción regenerada, la cantidad de portadores requeridos por camino transparente se reduce a uno, y por lo tanto los transpondedores pueden compartirse. Se puede ver que la cantidad de transpondedores requeridos no aumenta, cuatro para el caso transparente y cuatro para el caso regenerado. La cantidad de portadoras en uso tampoco cambia. Sin embargo, la cantidad de slots de espectro se reduce de 24 a 16, mejorando la eficiencia del espectro.

Incluso cuando los flujos no comparten los mismos nodos finales, la regeneración flexible utilizando SBVTs puede mejorar el rendimiento con un aumento de recursos mínimo. En el ejemplo que se muestra en la Figura 5.2, dos demandas deben provisionarse usando dos caminos. Una demanda del nodo A al nodo C y una demanda del nodo A al nodo D. Las rutas comparten el enlace del nodo A al nodo B. Si se asumen BVTs, incluso si el uso del espectro se reduce usando regeneración, se necesitan cuatro transpondedores adicionales y cuatro portadoras quedan inactivas. En la Figura 5.2 mostramos el mismo ejemplo pero asumiendo SBVTs. La cantidad de transpondedores requeridos para la opción regenerada se convierte en cinco, en lugar de ocho como cuando se usan BVTs. La cantidad de regeneradores aumenta en la opción regenerada, mientras que en el ejemplo anterior la cantidad de regeneradores permanece como en el caso transparente. Además, la cantidad de portadores inactivos crece a dos. Sin embargo, dado que estos transpondedores son SBVTs, los recursos inactivos podrían utilizarse para futuras demandas.

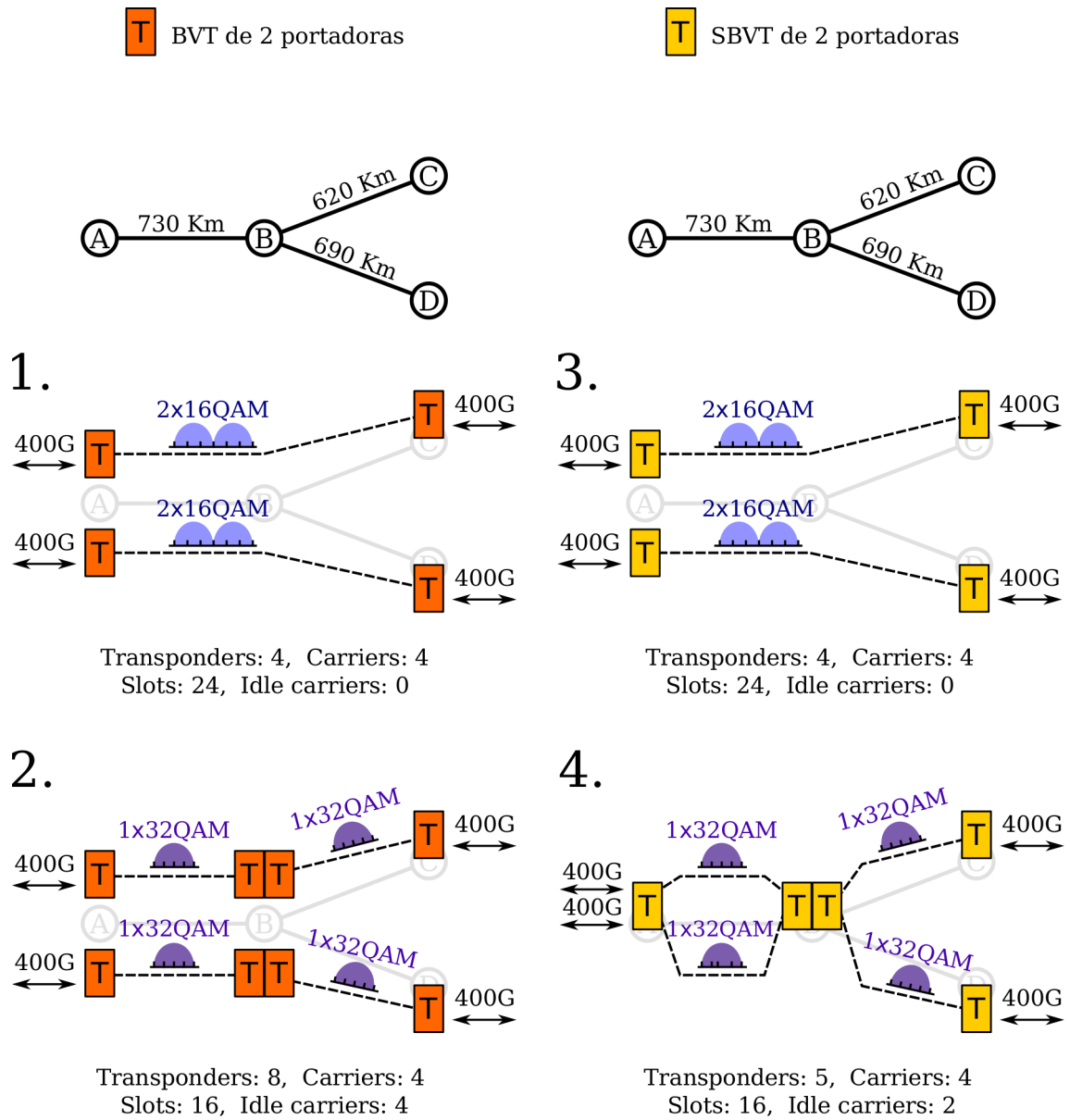


Figura 5.2: Aprovisionamiento de dos demandas de 400 Gb/s sobre caminos parcialmente disjuntos utilizando BVTs y SBVTs, sin y con regeneración.

5.3 Modelo del sistema

5.3.1 Modelo de red

Utilizamos el mismo modelo de red que en el Capítulo 4, los detalles se encuentran en la Sección 4.3.1. Además de la cantidad de slots $S(r)$ y la cantidad de transpondedores $T(r)$, introducimos dos nueva métricas para las opciones de regeneración. En primer lugar, la cantidad de portadoras $C(r)$, esta métrica es igual a la suma de las portadoras utilizadas en cada subcamino transparente.

En segundo lugar, la cantidad de extra de transpondedores $T'(r)$. Cuando se asumen SBVTs una demanda puede ser aprovisionada utilizando transpondedores que cursan tráfico de otros flujos, esta métrica computa la cantidad de transpondedores utilizados que no cursan tráfico de otras demandas. De esta manera $T'(r)$ considera el costo en términos de transpondedores “nuevos”.

5.3.2 Modelo BV-ROADM

Consideramos una red donde cada nodo es un multiplexor con agregación y extracción de señales óptico reconfigurable de ancho de banda variable *Bandwidth Variable Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer* (BV-ROADM). Asumimos también una arquitectura de nodo de conmutación de espectro de grilla flexible como se describe en la Sección 2.5.1, para más detalles acerca de esta arquitectura consultar [13]. Los BV-ROADMs admiten el redireccionamiento de supercanales ópticos con cualquier cantidad de slots de espectro de 12.5 GHz. Los BV-ROADM también tienen capacidades de agregar supercanales. La regeneración flexible se proporciona mediante el uso de dos transpondedores en una configuración espalda con espalda. Cada par de transpondedores constituye un *regenerador*. Los transpondedores no tienen que usar los mismos formatos de modulación o el mismo número de portadores. Además, no tienen que usar los mismos slots de espectro.

Al igual que en la regeneración tradicional, el uso de la regeneración flexible permite aumentar el alcance de los caminos translúcidos siempre que el alcance del camino no se pueda lograr de manera transparente. Además, la regeneración flexible permite superar el bloqueo del servicio debido a problemas de fragmentación del espectro. Finalmente, también permite el ahorro de recursos del espectro, mediante la compresión del espectro obtenida mediante el uso de formatos de modulación de alto orden.

Asumimos que cada BV-ROADM contiene un conjunto de transpondedores que pueden ser utilizados tanto para transmisión/recepción como para regeneración indistintamente.

5.3.3 Modelo de transpondedor

Consideramos un modelo de transpondedor elástico que admite una capacidad máxima C expresada en Gbit/s y un número máximo de operadores M_{max} . El transpondedor modula un conjunto de portadoras ópticas $M \leq M_{max}$ a una velocidad en baudios de B Gbaud/s, que incluye una sobrecarga de $H\%$ para la corrección de errores (FEC). Consideramos seis formatos de modulación: BPSK, QPSK, (8, 16, 32, 64) -QAM con su eficiencia espectral $\eta \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ respectivamente. La velocidad de bits para cada portadora óptica viene dada por $2 \cdot B \cdot \eta / (1 + H/100)$ cuando se considera la multiplexación por división de polarización (PDM). La capacidad del transpondedor no se supone limitada por la interfaz del cliente. En otras palabras, la capacidad de la interfaz del cliente es igual a la capacidad máxima de la línea, dada por la ecuación 5.1. Siempre se selecciona el formato de modulación más alto posible dada la distancia requerida, de forma de garantizar el mínimo requerimiento de espectro. Adoptamos el modelo GN [57], que

permite el cálculo de los efectos no lineales de la fibra óptica como una penalización de ruido lineal. En el apéndice A encontrarán mayores detalles sobre este modelo y las simplificaciones asumidas.

$$(5.1) \quad C = \frac{M \cdot 2 \cdot B \cdot \eta}{1 + H/100}$$

Para transportar una demanda $k = (o, d, c)$ la capacidad del transponder debe ser al menos c , por lo tanto $C \geq c$. Asumimos que el transponder soporta una tasa de símbolos variables B con $B \leq B_{max}$ expresados en Gbaud/s. B se configura siempre como la mínima tasa de símbolos necesaria para satisfacer la tasa de transferencia demandada $C = c$, dado un formato de modulación y un número de portadoras. A este fin, cada transponedor, más allá de si se utiliza en los extremos o para regeneración se configura de la siguiente manera.

Dados una longitud de transmisión, la máxima tasa de símbolos (N_{max}) y una sobrecarga H para corrección de errores:

1. Encontrar la modulación de mayor orden (eficiencia espectral η) soportada para la longitud de transmisión utilizando el modelo GN [57]. Para más información ver el Apéndice A.
2. Determinar el mínimo número de portadoras para la tasa de transferencia c

$$(5.2) \quad M = \left\lceil \frac{c \cdot (1 + H/100)}{2 \cdot B_{max} \cdot \eta} \right\rceil$$

Si el número de portadores M es mayor al número de portadoras del transponedor M_{max} , entonces el transponedor no puede ser usado y la transmisión no puede ser realizada.

3. Actualizar el valor de la tasa de símbolos B para producir c

$$(5.3) \quad B = \frac{c \cdot (1 + H/100)}{2 \cdot M \cdot \eta}$$

4. Calcular el número de slots necesarios como:

$$(5.4) \quad F = M \cdot \left\lceil \frac{B}{12.5 \text{ GHz}} \right\rceil$$

5.3.4 Modelo de segmentación compartida

Un transponedor segmentable de ancho de banda variable (SBVT) se puede compartir entre múltiples flujos. El principal impacto de esta capacidad es que cada vez que una transmisión requiere menos portadoras que las proporcionadas por un transponedor, las portadoras restantes pueden ser reutilizadas por otro flujo de tráfico. Este efecto reduce la probabilidad de bloqueo debido a la falta de portadores y, además, aumenta la eficiencia de un solo transponedor. Consideramos que cada transponedor de tipo SBVT puede alojar hasta M_{max} flujos, donde M_{max} es el número de portadoras que admite el transponedor (un transponedor no puede alojar más flujos que el número de portadoras que puede manejar). La segmentación puede aprovecharse tanto para transmisión/recepción como para regeneración.

5.4 Estrategias de aprovisionamiento

Para evaluar el impacto de compartir transpondedores, consideramos el uso de BVTs (no es posible compartir) o SBVTs (posible compartir) para dos estrategias de aprovisionamiento. Por un lado, evaluamos la estrategia *Transparente*, donde las demandas se aprovisionan a través de rutas completamente ópticas establecidas utilizando la modulación de orden más alto admitida en la ruta más corta entre el origen y el destino. Todos los slots de espectro requeridos se asignan contiguamente utilizando la política de primer ajuste (First-Fit). Además asumimos un slot vacío como banda de guarda entre todo par de super-canales adyacentes. Si no es posible la asignación de espectro, la demanda se bloquea.

Vale la pena mencionar que, bajo esta estrategia, la reutilización de transpondedores se limita al origen y destino de la conexión donde cada SBVT se puede usar para múltiples flujos (a lo sumo uno por portadora óptica) que no necesariamente tienen los mismos nodos de origen y destino.

Por otro lado, consideramos los fenómenos descritos en la Sección 5.2, por lo tanto la estrategia de aprovisionamiento intenta seleccionar la opción de regeneración que minimiza primero la cantidad de portadoras y luego el uso del espectro. Nos referimos a esta estrategia como asignación de regeneradores primero el mínimo número de portadoras (*Minimum Carriers First - Regenerator Assigment*) (MCF-RA). Cada vez que llega una nueva demanda, todas las opciones de regeneración (incluido el caso no regenerado) se calculan para la ruta más corta. Para cada una de estas opciones, se consideran los formatos de modulación de mayor orden posible y se verifica su disponibilidad de espectro, utilizando la política de primer ajuste (First-Fit) como en la estrategia *Transparente*. Las opciones que no se pueden acomodar en el espectro disponible se descartan. Si no hay opciones disponibles, se bloquea la demanda.

Si se acepta, la demanda se aprovisiona sobre la opción que minimiza en primer lugar el número de portadoras y en segundo lugar el uso del espectro. Como los SBVTs pueden usarse no solo en los puntos finales, sino también en nodos intermedios para una regeneración flexible, esta estrategia también prioriza el uso de SBVT activos (en operación) para minimizar el conteo de transpondedores, reduciendo así el costo general de la red.

También consideramos la estrategia UT-RA con una adaptación para ser utilizada con SBVTs. Esta adaptación se explica más adelante en la Sección 5.5.2.

5.5 Resultados

5.5.1 Análisis del efecto de los SBVTs

En primer lugar consideramos la topología de red COST266 [44], compuesta por 37 nodos y 57 enlaces bidireccionales que se muestra en la Figura 5.3. Cada enlace ofrece la banda C completa (4 THz) dividida en 320 slots de 12.5 GHz. Suponemos una matriz de tráfico uniforme entre todos los nodos, que consta de demandas de 400 Gbit/s. Los tiempos de llegada y de funcionamiento siguen

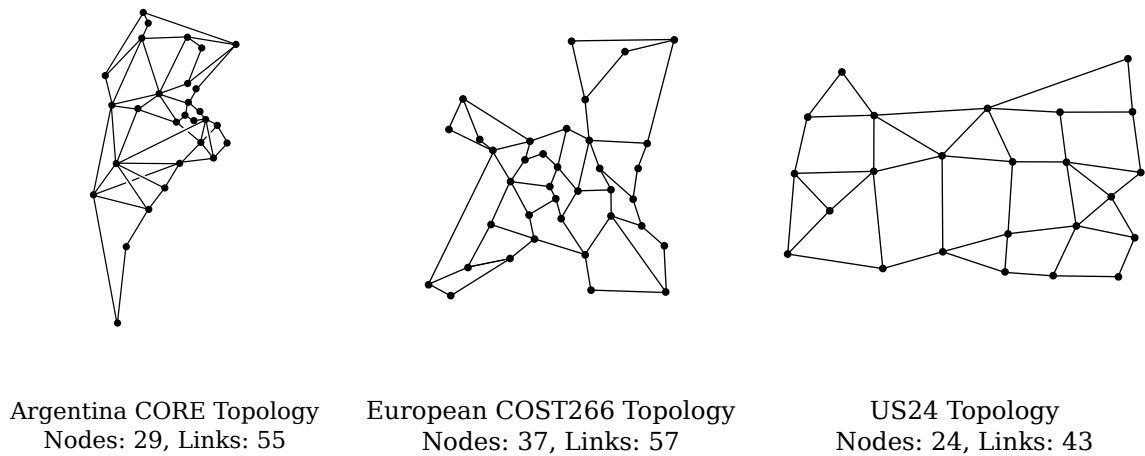


Figura 5.3: Topologías utilizadas para el análisis

procesos de Poisson. Todos los resultados mostrados se obtuvieron ejecutando 40 simulaciones independientes con 40 semillas diferentes con 500000 llegadas de demanda cada una. También informamos el intervalo de confianza de los valores como una sombra alrededor de los puntos, en la mayoría de los casos el intervalo de confianza está tan cerca del valor medio que no se puede apreciar.

Se consideran tanto los transponedores de tipo SBVTs como los BVTs para evaluar los beneficios de compartir transponedores, mientras que se analizan las estrategias *Transparente* y MCF-RA para evaluar las mejoras que introduce la regeneración flexible. Se asume un transponedor de portadora doble ($M_{max} = 2$) que admite BPSK, QPSK, (8, 16, 32, 64)-QAM ($\eta \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$), 25% de sobrecarga para la corrección de errores FEC a una tasa de errores de línea $BER=1e^{-2}$ ($H = 25$), y se supone una tasa de símbolos máxima de 50 Gbaud ($B = 50$). Vale la pena mencionar que un transponedor con una única portadora ($M_{max} = 1$) no es apropiado para esta topología de red, ya que solo 42 de los 57 enlaces pueden soportar una demanda de 400G sobre una única portadora, mientras que los 15 enlaces restantes requieren al menos 2 portadores. Por lo tanto, consideramos el caso de transponedores de doble portadora, ya que no está limitado por ninguna longitud de enlace.

5.5.1.1 Transponedores ilimitados de 2 portadoras

La Figura 5.4 muestran los resultados para el caso en que el número de transponedores por nodo es ilimitado. La Figura 5.4-A muestra la probabilidad de bloqueo en función de la carga ofrecida. La estrategia de aprovisionamiento MCF-RA supera claramente a la *Transparente* ya que su probabilidad de bloqueo es siempre mucho menor. Sin embargo, el uso de BVTs o SBVTs no tiene un impacto en la probabilidad de bloqueo como se esperaba. La razón de esto es que los nodos pueden acomodar tantos transponedores como sea necesario (caso ilimitado). En este contexto, la probabilidad de bloqueo solo depende de la estrategia de aprovisionamiento.

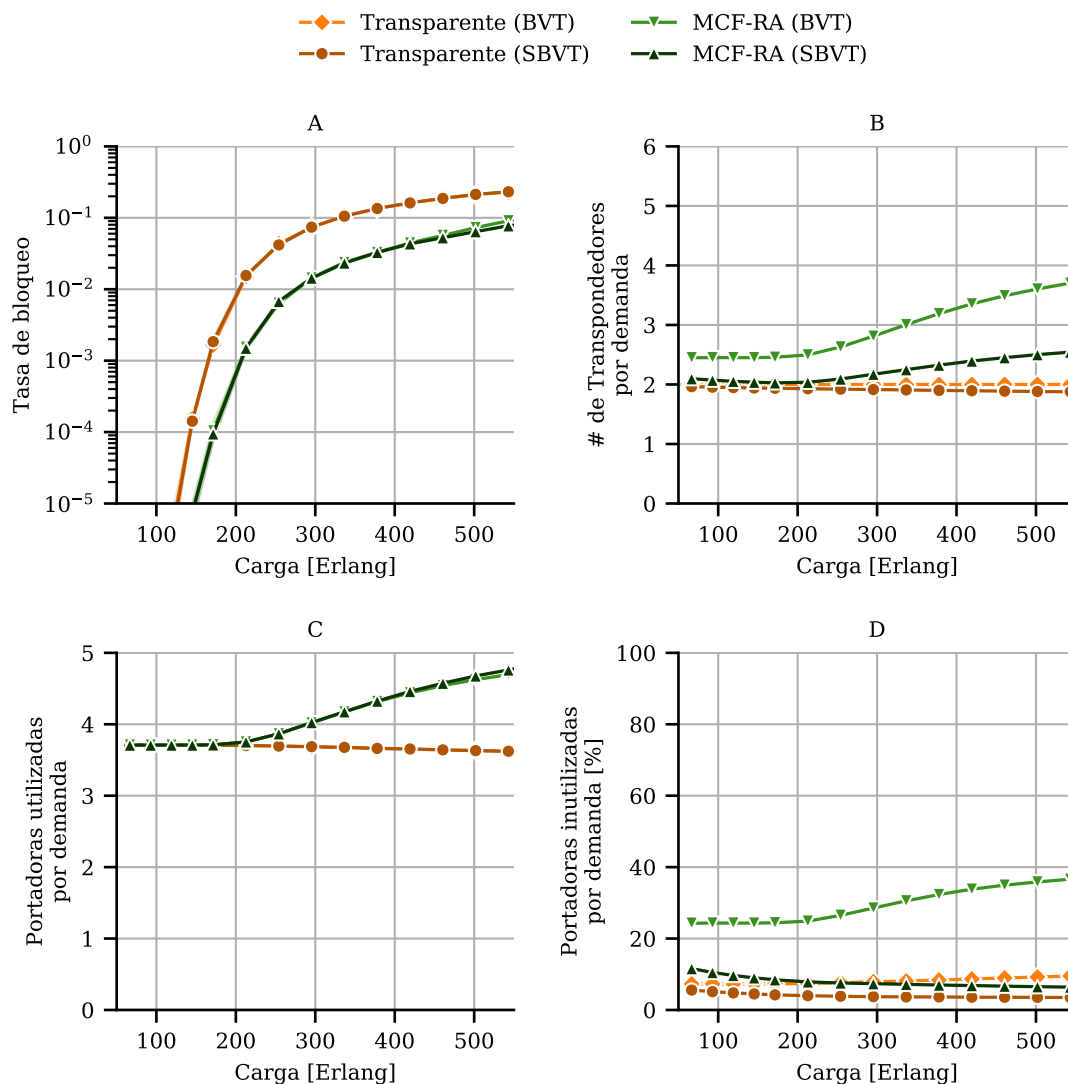


Figura 5.4: Resultados de simulación para la topología Europea COST266 bajo tráfico uniforme de 400G y transpondedores ilimitados de 2 portadoras cada uno. A) tasa de bloqueo de bitrate vs carga de la red B) Número de transpondedores por demanda vs carga de la red C) Porcentaje de portadoras en uso vs carga de la red, D) Porcentaje de portadoras inutilizadas vs carga de la red.

La Figura 5.4-B muestra el número de transpondedores por demanda en función de la carga. La estrategia *Transparente* tiene el costo más bajo en términos de transpondedores por demanda. Solo se usan dos transpondedores (ambos puntos finales) cuando se consideran los BVTs, pero si se usan los SBVTs, el costo es ligeramente inferior a 2, ya que algunas demandas pueden cubrirse con los SBVTs que ya están previamente instalados, por lo que no aumenta el número de transpondedores. Sin embargo, el resultado más interesante de esta figura es el hecho de que la cantidad de transpondedores tiende a aumentar con la carga cuando se usa la estrategia MCF-RA. Cuanto mayor sea la carga, más regeneración se necesita para mantener baja la probabilidad

de bloqueo (como se ilustra en la Figura 5.4-A). A altas cargas no hay holgura para minimizar el uso del espectro (y obtener una menor probabilidad de bloqueo), pero cuando se usan SBVTs en lugar de BVTs, el costo en términos de transpondedores puede ser mucho menor (casi un 40% menos si comparamos en cargas altas). La estrategia de aprovisionamiento MCF-RA puede entonces beneficiarse significativamente cuando se usan SBVTs en comparación con la estrategia *Transparente*, donde la ganancia es mucho menor (alrededor del 5% en cargas altas).

Los beneficios de compartir transpondedores (caso SBVT) también se pueden observar en el porcentaje de portadoras inactivas en la Figura 5.4-D. Si no es posible compartir (BVT), entonces el porcentaje de portadoras inactivas tiende a aumentar con la carga ofrecida. En cargas elevadas, las demandas que requieren una única portadora tendrán una mayor probabilidad de ser aceptadas debido a la fragmentación del espectro. Por lo tanto, la cantidad de portadoras no utilizadas aumenta más rápidamente que con cargas más bajas. En cambio, si está disponible el uso compartido (SBVT), el porcentaje de portadoras inactivas tiende a disminuir a medida que aumenta la carga ofrecida. Esto se relaciona con el hecho de que los SBVTs en funcionamiento pueden reutilizarse mejor a medida que haya más portadoras inactivas, (transpondedores) disponibles.

En este ejemplo se ve claramente que cuando se utilizan SBVTs es posible obtener mejoras en la probabilidad de bloqueo utilizando regeneración flexible a un costo comparable al caso transparente con BVTs. En el caso del uso de BVTs el uso de regeneración siempre implica un aumento en el costo asociado en términos de transpondedores. Sin embargo cuando se asumen SBVTs es posible obtener mejoras en la probabilidad de bloqueo con costos comparables.

5.5.1.2 Transpondedores ilimitados de 4 portadoras

En la Figura 5.5 mostramos los mismo resultados pero para el caso en donde los transpondedores tienen 4 portadoras cada uno en lugar de 2. Como se puede ver en la Figura 5.5-A el comportamiento en términos de la probabilidad de bloqueo es similar al caso anterior. Sin embargo para los dos casos de uso de SBVTs el número de transpondedores requeridos disminuye, esto se da debido a que al tener 4 portadoras por transpondedor las oportunidades para compartir transpondedores aumentan significativamente. Lo mas interesante a ver en este caso es el porcentaje de portadoras inutilizadas en la Figura 5.5-D, que en términos absolutos todos los casos se comportan peor pero en términos relativos la estrategia *Transparente* con BVTs presenta un comportamiento significativamente peor. En el caso de 2 portadoras por transpondedor esta estrategia mostraba un comportamiento similar al caso *Transparente* con SBVTs sin embargo para 4 portadoras por transpondedor su comportamiento se asemeja más al caso MCF-RA con BVTs. Específicamente, el porcentaje de portadoras inutilizadas supera el 50% en todo el rango de cargas. Esta diferencia se debe a que en esta topología en particular prácticamente todas las demandas pueden ser satisfechas de forma transparente sobre los caminos más cortos utilizando 1 o 2 portadoras. Por lo que, los transpondedores BVT de 4 portadoras están sobre dimensionados

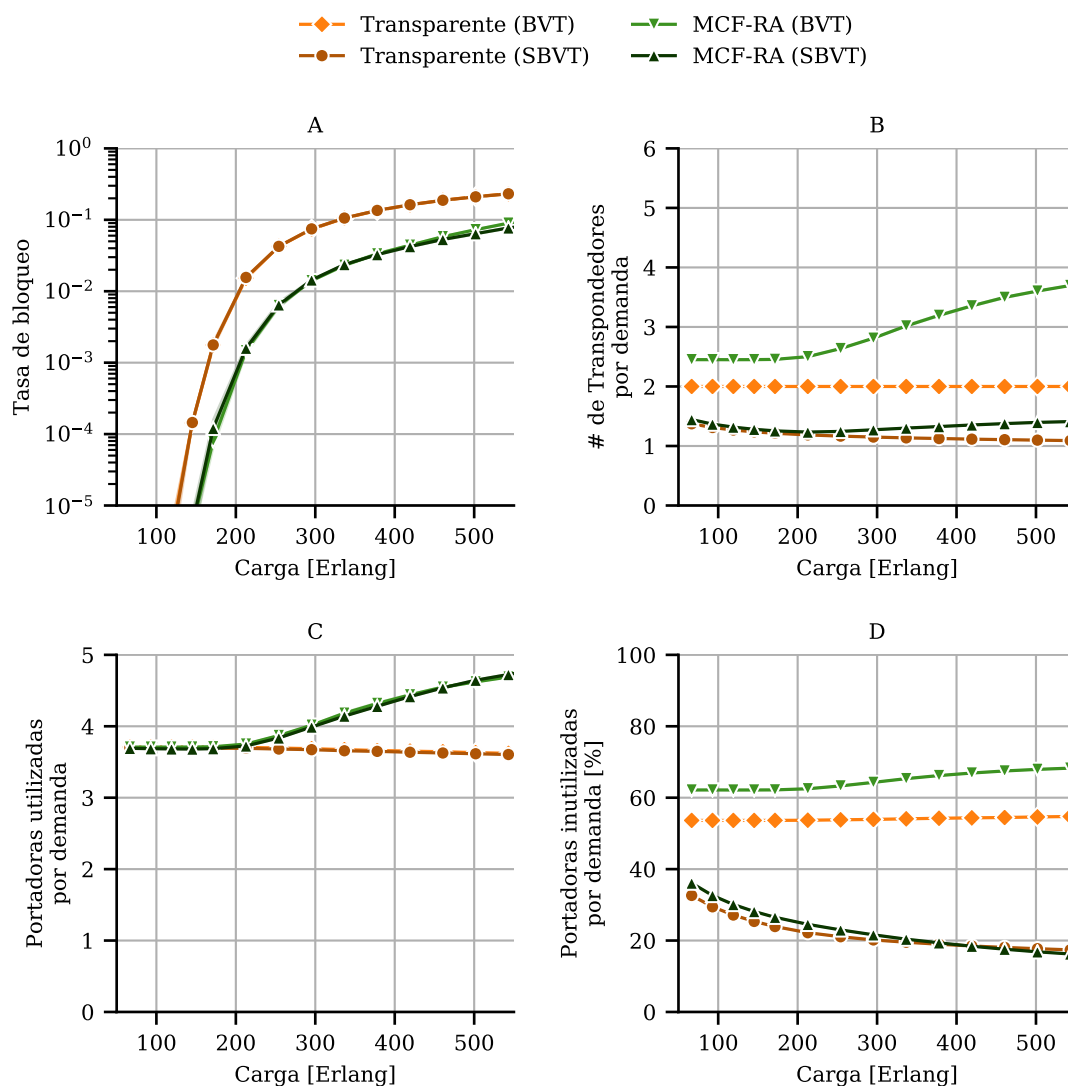


Figura 5.5: Resultados de simulación para la topología Europea COST266 bajo tráfico uniforme de 400G y transpondedores ilimitados por nodo de 4 portadoras cada uno. A) tasa de bloqueo de bitrate vs carga de la red B) Número de transpondedores por demanda vs carga de la red C) Porcentaje de portadoras en uso vs carga de la red, D) Porcentaje de portadoras inutilizadas vs carga de la red.

para esta red. Esto puede apreciarse comparando las Figuras 5.4-C y 5.5-C, el número de portadoras promedio por demanda está ligeramente debajo de 2 para el caso *Transparente* y ligeramente por encima de 2 para el caso MCF-RA tanto para el escenario con transpondedores de 2 portadoras como para el caso con transpondedores de 4 portadoras. Este resultado muestra con claridad la necesidad del uso de SBVTs a medida que el requerimiento de portadoras por transpondedor crece que en el caso del uso de BVTs puede provocar enormes desperdicios de recursos en términos de portadoras inutilizadas.

5.5.1.3 Transponedores limitados de 2 portadoras

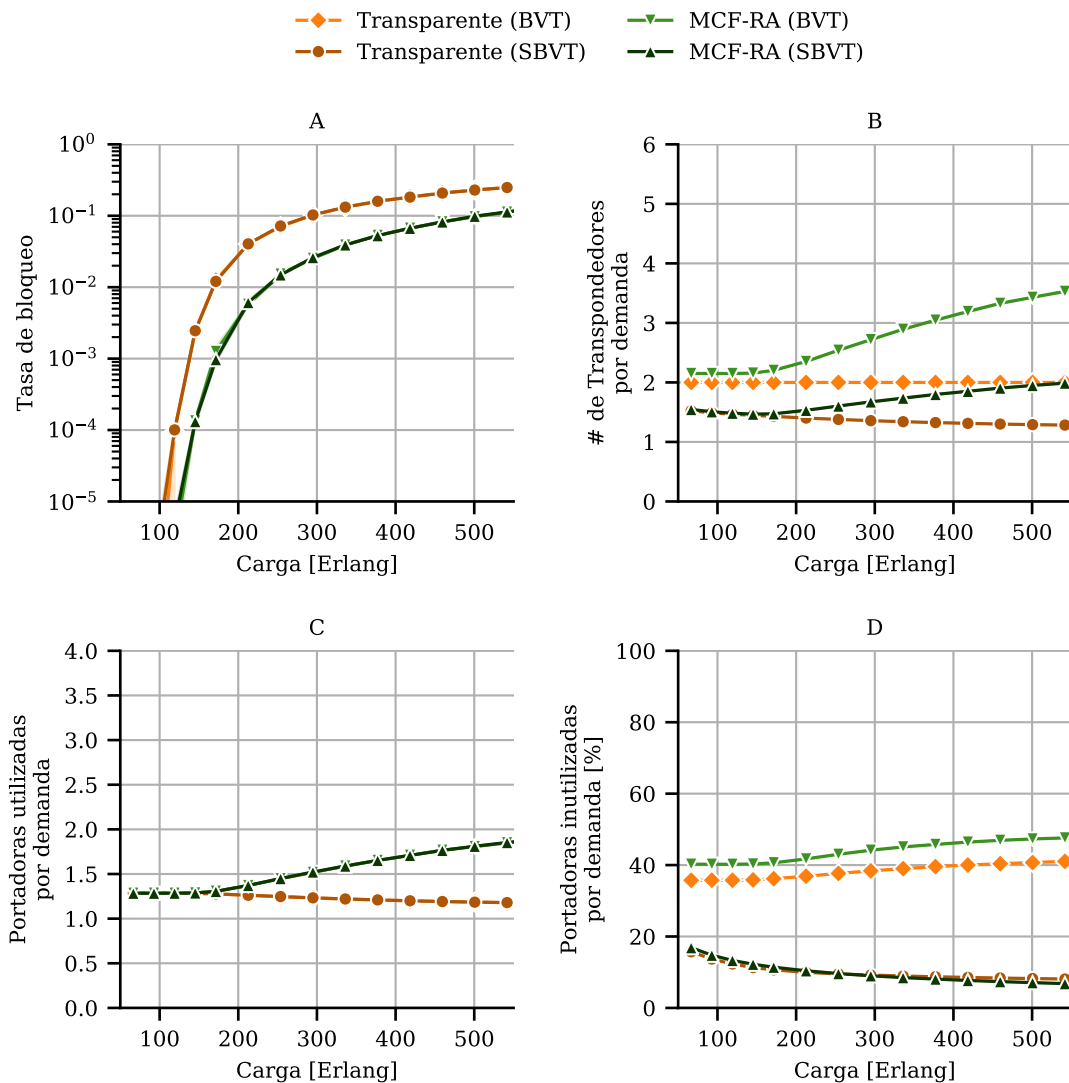


Figura 5.6: Resultados de simulación para la topología Europea COST266 bajo tráfico uniforme de tasa mixta (100G, 200G y 400G) y 80 transponedores por nodo de 4 portadoras cada uno. A) tasa de bloqueo de bitrate vs Carga de la red B) Número de transponedores por demanda vs Carga de la red C) Porcentaje de portadoras en uso vs Carga de la red, D) Porcentaje de portadoras inutilizadas vs Carga de la red.

En la Figura 5.6 mostramos los resultados para el caso con transponedores de 2 portadoras pero bajo un tráfico dinámico de tasa mixta. La tasa de bits de las demandas se selecciona de forma aleatoria uniformemente entre 100G, 200G y 400G. Bajo este tráfico dinámico se puede apreciar que las ganancias en términos de probabilidad de bloqueo que se obtenían utilizando la estrategia MCF-RA se mantienen. Sí se observa una mejora en el comportamiento en términos de transponedores por demanda cuando se utilizan SBVTs. Esto se debe principalmente a que

las demandas de 200G y 100G son más fáciles de acomodar para que utilicen las portadoras disponibles en los transpondedores activos con portadoras disponibles. Finalmente, en términos de portadoras inutilizadas, Figura 5.6 se vuelve a ver una penalización para el caso *Transparente* con BVTs. La razón para esta penalización es que las demandas de 100G y 200G tienden a utilizar una única portadora, por lo que aproximadamente un 35% de las portadoras quedan inutilizadas. Una de las principales ventajas de tener transpondedores de múltiples portadoras es que pueden acomodar demandas de diferentes tasas de bits, sin embargo utilizar un BVT de 2 portadoras para una conexión de 100G que utiliza una única portadora obliga a que la segunda portadora quede inutilizada. Es por esto que en escenarios de tráfico de tasa mixta el uso de SBVTs presenta una gran ventaja, disminuyendo el porcentaje de portadoras de un 40% a valores por debajo del 10% en este caso en particular.

Una vez más se vuelve a observar que al utilizar SBVTs es posible gracias a la regeneración compartida obtener mejoras en términos de la probabilidad de bloqueo a costos comparables con el caso *Transparente*.

5.5.1.4 Sensibilidad con respecto al límite de transpondedores

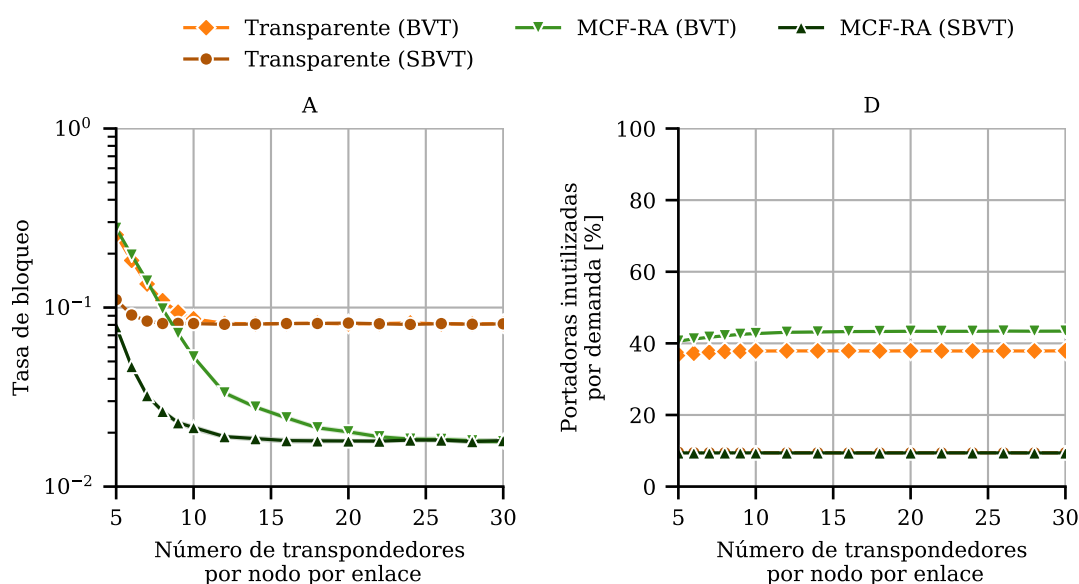


Figura 5.7: Probabilidad de bloqueo en función del número de transpondedores por nodo bajo una carga de 260 Erlang para una matriz de tráfico uniforme de tasa mixta de 100, 200 y 400 Gb/s sobre la topología Europea COST266. Caso de número limitado de transpondedores por nodo.

Con el objetivo de analizar el impacto del límite de transpondedores por nodo, asumimos el caso donde la cantidad de transpondedores por nodo es proporcional al grado del nodo. Esto representa un escenario realista en redes ya desplegadas, consideramos un rango de transpondedores por nodo por enlace de 10 a 30. La Figura 5.7 se muestra la tasa de bloqueo y el

porcentaje de portadoras inutilizadas en función de la cantidad de transpondedores por nodo por enlace para una carga intermedia de 260 Erlang. En general, a medida que aumenta la cantidad de transpondedores por nodo por enlace, la probabilidad de bloqueo disminuye. Sin embargo, la estrategia *Transparente* no puede disminuir la probabilidad de bloqueo después de los 12 transpondedores por nodo por enlace aproximadamente, ya que el efecto dominante pasa a ser la escasez de recursos de espectro. Como se mencionó anteriormente, los beneficios de los SBVTs con respecto a los BVTs son casi insignificantes cuando se utiliza la estrategia transparente. En contraste, cuando se considera la estrategia MCF-RA no solo la probabilidad de bloqueo puede disminuir aún más, sino que mediante el uso de SBVTs se logra un desempeño aún mejor. Vale la pena mencionar que la ganancia de rendimiento del uso de SBVTs ahora también se traduce en una menor probabilidad de bloqueo. De hecho, los transpondedores disponibles por nodo pueden compartirse con fines de regeneración, lo que ayuda a optimizar el uso del espectro.

En esta sección utilizamos el esquema MCF-RA para obtener mejoras en términos de tasa de bloqueo con un mínimo incremento del costo asociado en términos de transpondedores. Esto muestra que los fenómenos relacionados con la regeneración compartida expuestos en la Sección 5.2 pueden ser aprovechados en un esquema de aprovisionamiento. Consideramos que algoritmo de aprovisionamiento para redes EON con transpondedores de tipo SBVT debería tener esto en cuenta para hacer un uso óptimo de los recursos.

5.5.2 Comparación con la estrategia UT-RA

Para aprovechar las ventajas descriptas en la sección anterior adaptamos el algoritmo de aprovisionamiento translúcido basado en utilización para redes EON del Capítulo 4 (UT-RA) para el uso de transpondedores SBVTs. El flujo del algoritmo es el mismo que se describió en el capítulo anterior, se muestra en la Figura 4.5. Dada una ruta para la demanda, se calculan todas las opciones de regeneración y se descartan las que están bloqueadas. Luego, el conjunto de Pareto se obtiene descartando aquellas opciones que no son Pareto óptimas. Si no hay ninguna opción disponible, la demanda se bloquea. Finalmente, se selecciona la opción de regeneración que minimice el recurso más utilizado (espectro o transpondedores) sobre un subconjunto del conjunto de Pareto limitado en función de la utilización de recursos y de las características de la demanda, como se muestra en Algoritmo 6.

Algoritmo 6: UT-RA selección de opciones basada en utilización para SBVTs

Dado el conjunto de Pareto para el camino p , $P(p)$;
 Calcular $U_t(p)$ (utilización de transpondedores de p);
 Calcular $U_s(p)$ (utilización de espectro de p);
 Calcular $S_{max}(p)$ (slots de espectro de la opción transparente);
 Calcular $S_{min}(p)$ (slots de espectro de la opción opaca);
 Calcular $T'_{max}(p)$ (número de transpondedores extra de la opción opaca);
 $\alpha_T \leftarrow (1 - \beta) \times (1 - U_t(p)) \times T'_{max}(p)$;
 $\alpha_S \leftarrow (1 - \beta) \times (1 - U_s(p)) \times (S_{max}(p) - S_{min}(p)) + S_{min}(p)$;
 $P'(p) \leftarrow \{r \in P(p) \mid S(r) \leq \alpha_S \text{ and } T'(r) \leq \alpha_T\}$;
if $P'(p)$ *is vacío* **then**
 | $P'(p) \leftarrow P(p)$;
end
if $U_t(p) > U_s(p)$ **then**
 | **encontrar** r | $T'(r)$ *is* $\min\{T'(r) \mid r \in P'(p)\}$;
 | $option \leftarrow r$;
end
else
 | **encontrar** r | $S(r)$ *is* $\min\{S(r) \mid r \in P'(p)\}$;
 | $option \leftarrow r$;
end
return $option$

La adaptación para redes con SBVTs consiste en modificar el cómputo de $T(r)$ que es el costo asociado a la opción de regeneración en términos de regeneradores. En el caso de redes con BVTs este costo es igual al incremento de transpondedores utilizados, si se necesitan 2 para transmisión/recepción y 2 por cada regenerador, entonces $T(r)$ se incrementa en 1 por cada nuevo regenerador. En cambio para el caso de redes con SBVTs modificamos este cálculo para tener en cuenta únicamente a aquellos transpondedores extras necesarios $T'(r)$. Ahora $T'(r)$ representa número de transpondedores extra. Llamamos transpondedor extra a todo aquel transpondedor que al momento de ser asignado no cursaba tráfico de ningún flujo. Esto quiere decir que si una demanda puede ser aprovisionada utilizando portadoras libres de transpondedores ya utilizados por otros flujos el costo $T'(r)$ de dicha opción será cero. Esto permite favorecer la reutilización de transpondedores.

Comparamos el comportamiento de la estrategia basada en utilización (UT-RA). Consideramos las mismas condiciones de red que en los casos anteriores, tráfico mixto de 100, 200 y 400 Gb/s sobre la topología COST266 con transpondedores ilimitados de 2 portadoras.

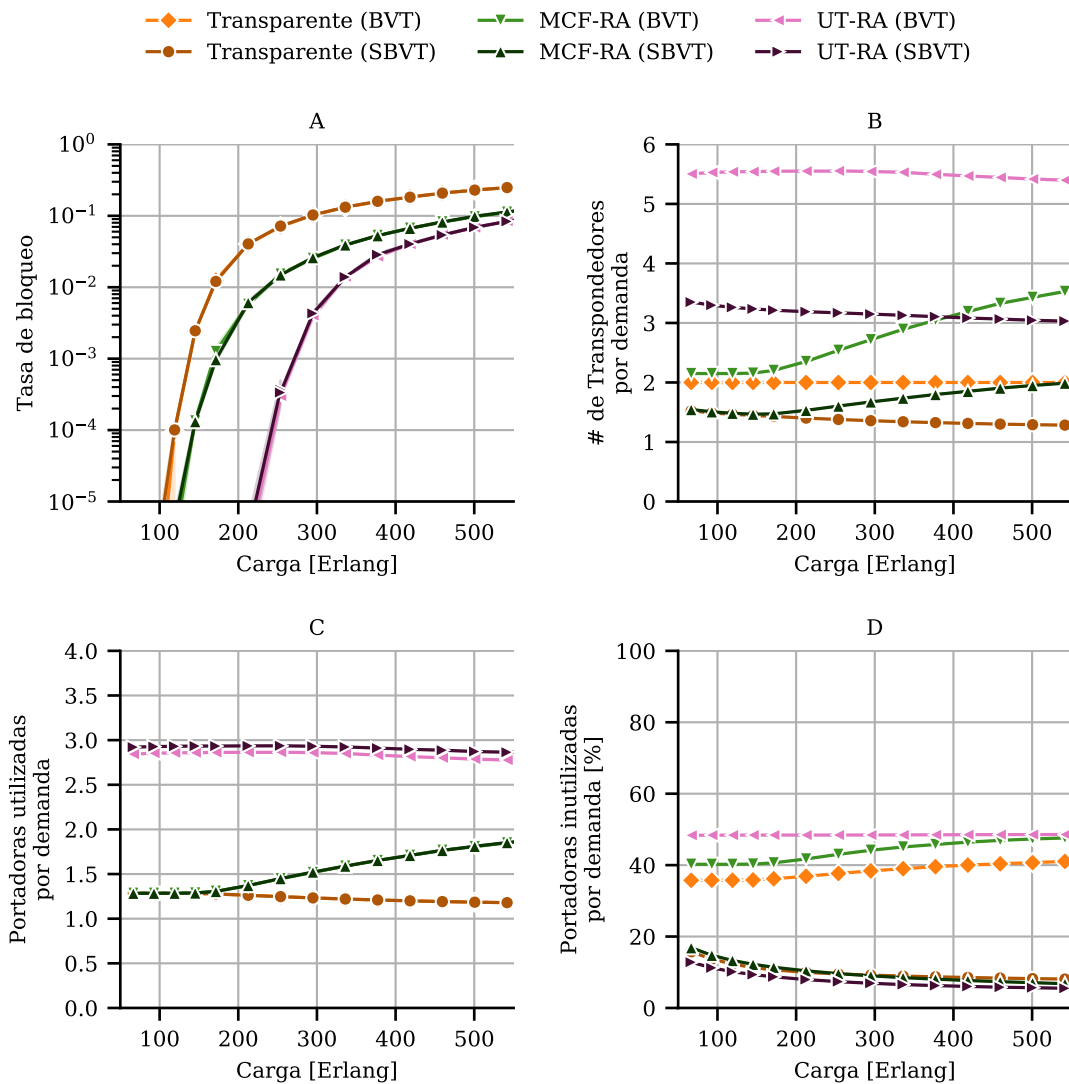


Figura 5.8: Resultados de simulación para la topología Europea COST266 bajo tráfico uniforme de tasa mixta (100G, 200G y 400G) y transpondedores ilimitados por nodo de 2 portadoras cada uno para la estrategia UT-RA. A) tasa de bloqueo de bitrate vs carga de la red B) Número de transpondedores por demanda vs carga de la red C) Porcentaje de portadoras en uso vs carga de la red, D) Porcentaje de portadoras inutilizadas vs carga de la red.

5.5.2.1 Transpondedores ilimitados de 2 portadoras

En la Figura 5.8 mostramos la tasa de bloqueo, número de transpondedores por demanda, total de portadoras por demanda y porcentaje de portadoras inutilizadas por demanda en función de la carga. En este caso donde el número de transpondedores por nodo es ilimitado, la estrategia UT-RA permite disminuir fuertemente la tasa de bloqueo. Obteniendo mejoras superiores a 100 veces con respecto a MCF-RA y superiores a 1000 veces con respecto al caso *Transparente* para cargas bajas. Esta mejora en términos de bloqueo se logra gracias al incremento de la

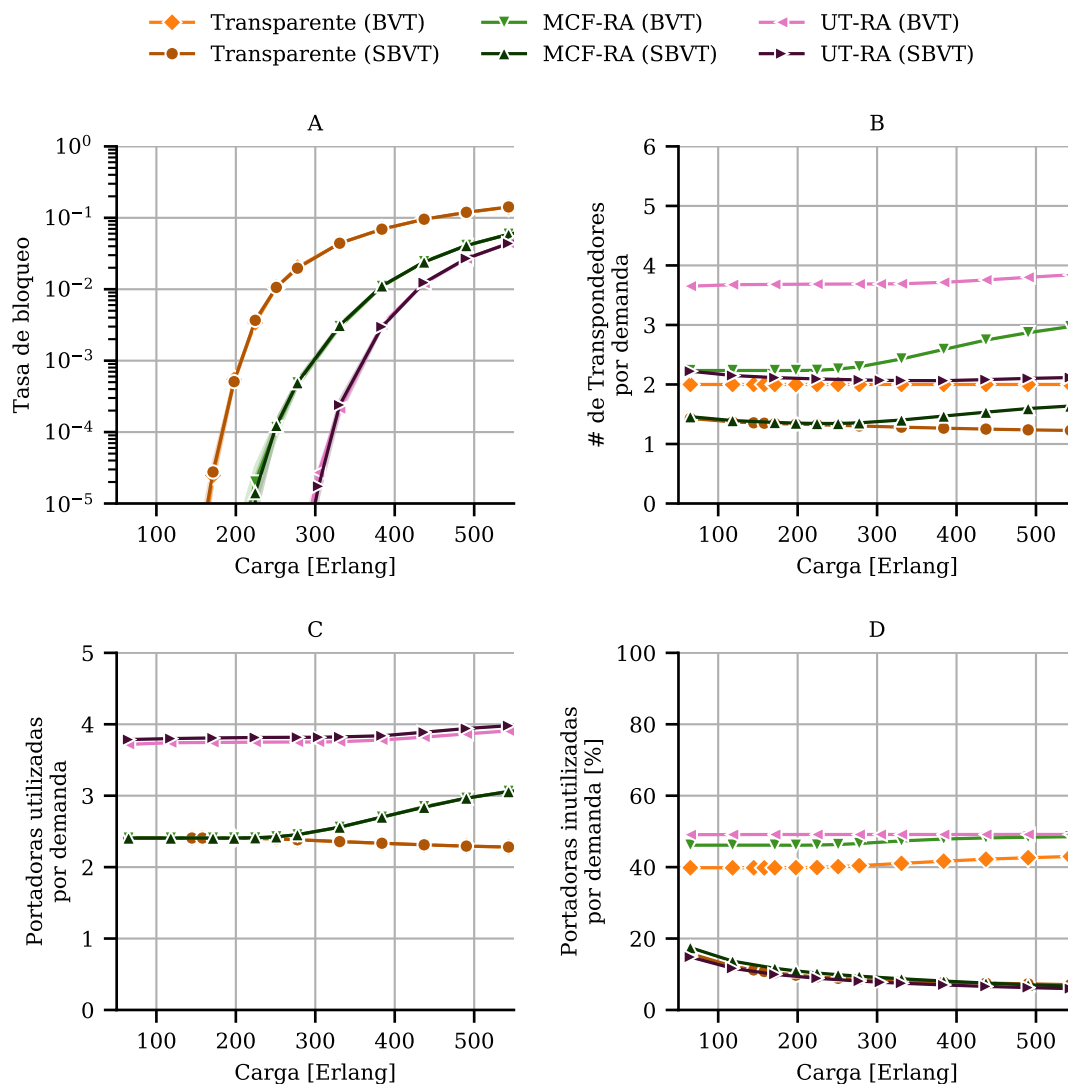


Figura 5.9: Resultados de simulación para la topología Argentina CORE bajo tráfico uniforme de tasa mixta (100G, 200G y 400G) y transpondedores ilimitados por nodo de 2 portadoras cada uno para la estrategia UT-RA. A) tasa de bloqueo de bitrate vs Carga de la red B) Número de transpondedores por demanda vs Carga de la red C) Porcentaje de portadoras en uso vs Carga de la red, D) Porcentaje de portadoras inutilizadas vs Carga de la red.

regeneración, que en el caso con BVTs representa un incremento cercano al 2.7 veces en términos de transpondedores con respecto al caso *Transparente*, Figura 5.8-B, y un incremento de 1.5 veces para el caso con SBVTs. En la Figura 5.8-C mostramos el número promedio de portadoras por demanda, la estrategia UT-RA utiliza casi 2.7 veces más portadoras que el caso *Transparente* como efecto de la regeneración. Mientras que el porcentaje de portadoras inutilizadas por demanda se mantiene similar al resto de las estrategias, tanto para el caso con SBVTs como para el caso con BVTs.

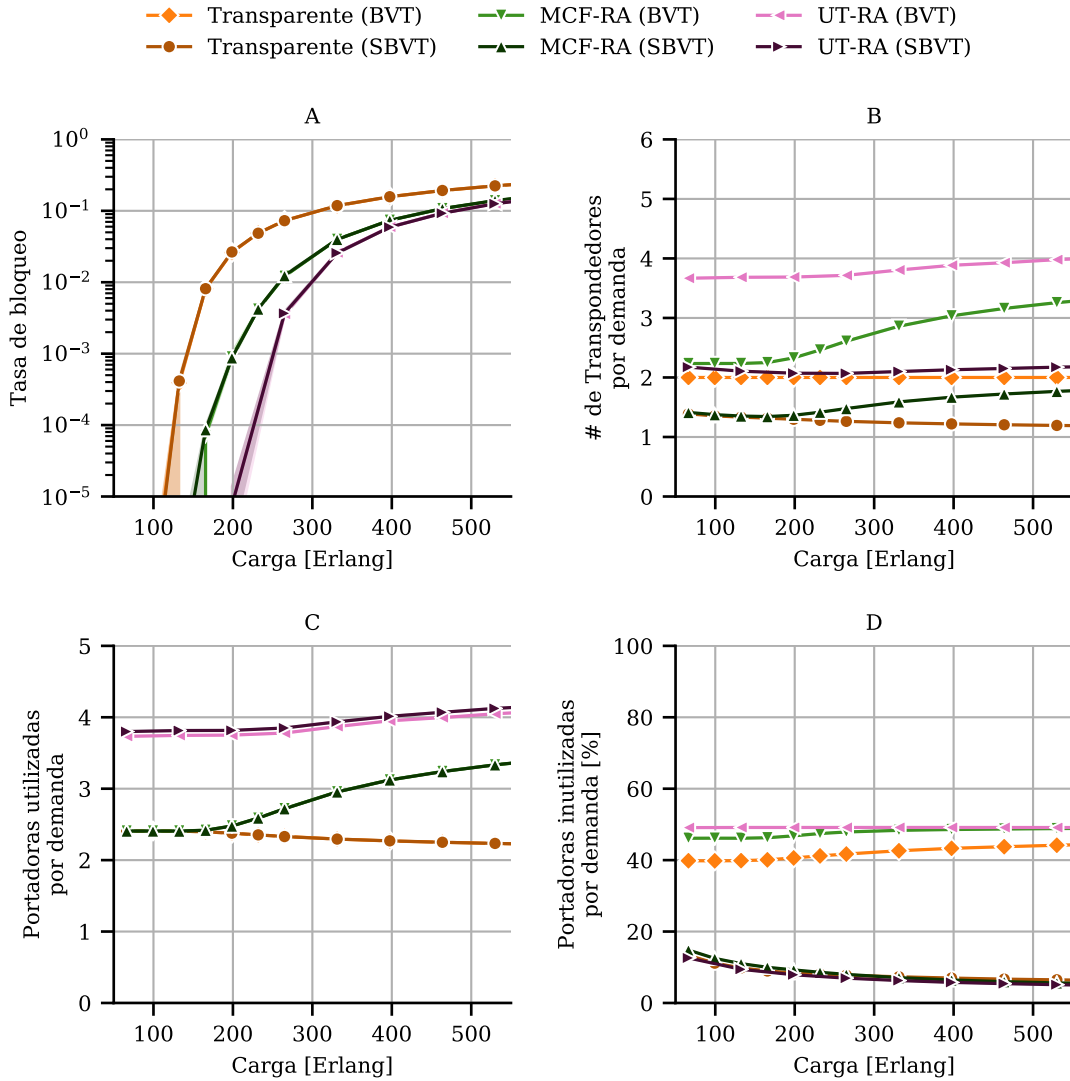


Figura 5.10: Resultados de simulación para la topología Estadounidense US24 bajo tráfico uniforme de tasa mixta (100G, 200G y 400G) y transponedores ilimitados por nodo de 2 portadoras cada uno para la estrategia UT-RA. A) tasa de bloqueo de bitrate vs Carga de la red B) Número de transponedores por demanda vs Carga de la red C) Porcentaje de portadoras en uso vs Carga de la red, D) Porcentaje de portadoras inutilizadas vs Carga de la red.

En la Figura 5.9 mostramos los resultados para la topología de red Argentina CORE que se muestra en la Figura 5.3. Utilizamos una matriz de tráfico uniforme con demandas de tasa mixta de 100, 200 y 400 Gb/s. Se asumen transponedores ilimitados por nodo de 2 portadoras cada uno. En la Figura 5.9-A se puede observar que el comportamiento relativo de las diferentes estrategias se mantiene con respecto a la topología COST266. La estrategia MCF-RA permite mejorar la probabilidad de bloqueo en factores que superan las 10 veces para cargas bajas, mientras que la estrategia UT-RA permite mejorar este factor en varios ordenes de magnitud. En términos

de costo, como se puede ver en la Figura 5.9-B, cuando se utilizan SBVTs la estrategia MCF-RA se mantiene comparable con respecto al caso *Transparente*. La estrategia UT-RA requiere sin embargo para este caso de transpondedores ilimitados un incremento de 0.8 veces en la cantidad de transpondedores con respecto al caso *Transparente*. Al igual que en el caso de la topología COST266, la utilización de SBVTs permite mantener el porcentaje de portadoras inutilizadas por debajo del 20% contra el 40% o más del caso que utiliza BVTs, Figura 5.9.

Por último mostramos los resultados para la topología US24 que se muestra en la Figura 5.3 bajo tráfico dinámico de tasa mixta de 100, 200 y 400G. Se asumen transpondedores de 4 portadoras, ya que para esta topología la utilización de transpondedores de 2 portadoras no permite establecer todas las demandas de forma transparente. En la Figura 5.10-A se muestra la tasa de bloqueo en función de la carga de la red. Estos resultados respaldan una vez más lo mostrado anteriormente, la estrategia MCF-RA permite disminuir la tasas de bloqueo en factores superiores a las 10 veces para cargas bajas, mientras que la estrategia UT-RA permite mejorar este factor aún más. El costo en términos de número de transpondedores por demanda se reduce significativamente cuando se utilizan SBVTs en lugar de transpondedor de ancho de banda variable (*Bandwidth Variable Transponder*) (BVT)s, Figura 5.10-B. Mientras que el porcentaje de portadoras inutilizadas se logra mantener debajo del 20% cuando se utilizan SBVTs sin importar que estrategia se utilice.

Al igual que en el caso de redes equipadas con BVTs, en las redes equipadas con SBVTs la regeneración puede ayudar a reducir significativamente las probabilidades de bloqueo de nuevas demandas. Mas aún, el uso de SBVTs permite reducir en gran medida el costo asociado a la regeneración. Ambas estrategias MCF-RA y UT-RA hacen uso de la regeneración en diferentes grados. El primer caso utiliza la regeneración únicamente cuando esto implica una reducción en el número de portadoras en primer lugar y en el número de slots de espectro en segundo lugar. Esto permite mejorar el desempeño en términos de probabilidad de bloqueo con costos comparables al aprovisionamiento *Transparente*. Por su parte la estrategia UT-RA permite utilizar el espectro más eficientemente mediante el uso de opciones más regeneradas y por lo tanto con un costo ligeramente mayor, logrando un desempeño aún mejor en términos de probabilidad de bloqueo.

5.5.2.2 Sensibilidad con respecto al límite de transpondedores

En la Figura 5.11 comparamos la probabilidad de bloqueo en función de la cantidad de transpondedores por nodo por enlace. Asumimos transpondedores de 2 portadoras y tráfico dinámico de tasa mixta de 100, 200 y 400 Gb/s. Cómo puede observarse, la estrategia *Transparente* es muy poco sensible al número de transpondedores, con una leve disminución de la tasa de bloqueo entre 5 y 10 transpondedores por nodo por enlace y luego sin variaciones para todo el rango de 10 a 30 transpondedores por nodo por enlace. Además, esta estrategia presenta una leve ventaja entre el uso de BVTs y SBVTs, con el segundo caso teniendo mejor desempeño para cantidades bajas de transpondedores.

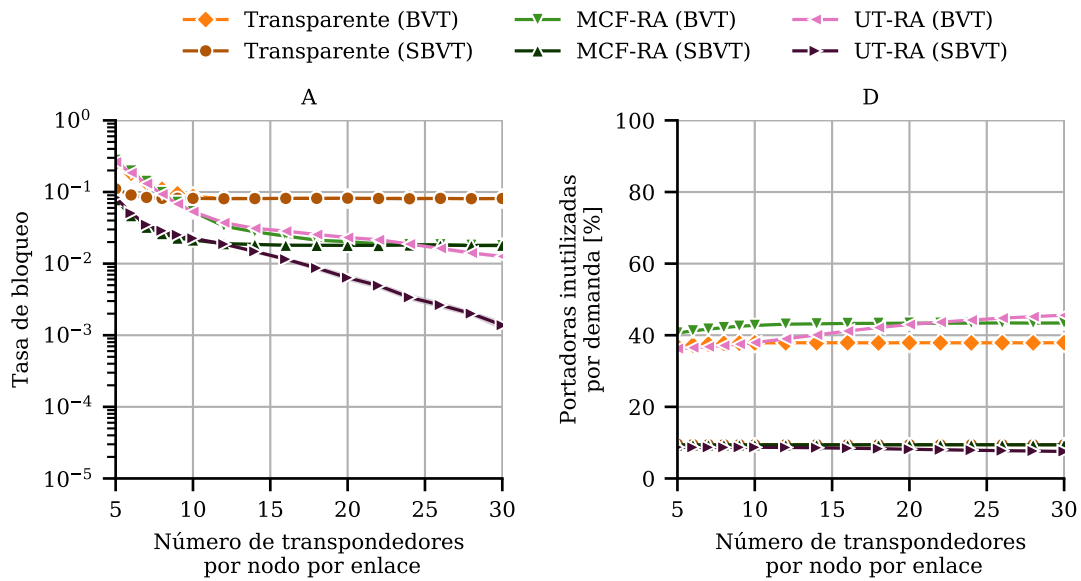


Figura 5.11: Probabilidad de bloqueo en función del número de transpondedores por nodo bajo una carga de 260 Erlang para una matriz de tráfico uniforme de tasa mixta de 100, 200 y 400 Gb/s sobre la topología Europea COST266. Caso de número limitado de transpondedores por nodo.

Por su parte la estrategia MCF-RA permite mejorar el desempeño en términos de probabilidad de bloqueo con respecto al caso *Transparente*. Obteniendo una mejora cercana a 10 veces para un número mayor de 20 transpondedores por nodo por enlace. Sin embargo se observa una fuerte diferencia entre el uso de BVTs y SBVTs. Cuando se utilizan SBVTs la probabilidad de bloqueo presenta el mismo comportamiento que el caso *Transparente* para un número menor de 10 transpondedores por nodo por enlace y mejorando el desempeño para un número mayor. La principal ventaja se presenta cuando se asumen SBVTs, donde esta estrategia presenta siempre un mejor desempeño que el caso *Transparente*.

Finalmente, la estrategia UT-RA permite mejorar los resultados del caso MCF-RA cuando se disponen de más de 15 transpondedores por nodo por enlace. Para el rango de transpondedores por nodo por enlace analizado, de 5 a 30, no se alcanza un comportamiento estacionario en la probabilidad de bloqueo. Sin embargo, eventualmente para un número grande de transpondedores por nodo por enlace la probabilidad de bloqueo alcanza un valor mínimo y ya no puede mejorar al aumentar la cantidad de transpondedores.

En la Figura 5.11-B mostramos el porcentaje de portadoras inutilizadas en función del límite de transpondedores por nodo por enlace. Sin importar el límite en el número de transpondedores el uso de SBVTs permite minimizar el número de portadoras inutilizadas independientemente de la estrategia que se utilice.

Cuando se asume el uso de SBVTs un estrategia consciente de los recursos como es UT-RA

permite disminuir las probabilidades de bloqueo y por lo tanto incrementar la capacidad de la red independientemente del número de transpondedores disponibles gracias a su capacidad de minimizar el número de portadoras inutilizadas. Esta diferencia fundamental con respecto a lo que sucede cuando se utilizan BVTs hace que el aprovisionamiento translucido sea una opción óptima para redes EON equipadas con SBVTs.

5.6 Conclusiones

En este capítulo, consideramos por primera vez el impacto de los SBVTs en las redes EON cuando las demandas se aprovisionan utilizando conexiones translúcidas. Primero, discutimos casos potenciales en los que el uso de regeneración flexible compartida puede mejorar la eficiencia del espectro utilizando prácticamente los mismos transpondedores.

Con el objetivo de evaluar si los fenómenos descritos se podían aprovechar en el aprovisionamiento de demandas se desarrolló el algoritmo asignación de regeneradores primero el mínimo número de portadoras (*Minimum Carriers First - Regenerator Assignment*) (MCF-RA). Evaluamos mediante simulación esta estrategia en la topología de red (red COST266 europea). Mostramos que utilizando esta estrategia en redes con SBVTs es posible disminuir las tasas de bloqueo en factores que superan las 10 veces para cargas medias y bajas, a un incremento de costo comparable que en la mayoría de los casos no superó las 0.8 veces. Mostramos también que el porcentaje de portadoras inutilizadas mejora significativamente cuando se utilizan SBVTs en lugar BVTs, bajando de valores superiores a 50% a valores menores al 20% para cargas bajas y menores al 10% para cargas altas. En el caso transparente no hay mejoras en términos de tasas de bloqueo al utilizar SBVTs. Habiendo mostrado las ventajas que puede representar el uso de SBVTs en el aprovisionamiento translucido, adaptamos el algoritmo basado en utilización (UT-RA) para aprovisionamiento para aprovechar dichas ventajas. Mostramos resultados de simulación para tráfico dinámico sobre tres topologías de red (COST266, Argentina CORE y US24). La estrategia UT-RA adaptada permite obtener mejoras en las probabilidades de bloqueo que supera a la estrategia MCF-RA a un costo mayor en términos de transpondedores.

Mostramos además que, sin importar el número de transpondedores disponibles esta estrategia presenta mejor desempeño que la estrategia *Transparente*. En contraste con lo que sucede cuando se utilizan BVTs, donde la regeneración siempre representa un incremento en la cantidad de transpondedores requeridos. Esta diferencia fundamental, hace que el aprovisionamiento translucido sea una opción óptima para redes EON equipadas con SBVTs.

Los resultados mostrados en este capítulo se presentaron de forma parcial en la conferencia global de comunicaciones GLOBECOM 2018 en Diciembre de 2018 en el simposio de sistemas y redes ópticas.

CONCLUSIONES

En esta tesis abordamos el problema del aprovisionamiento en redes elásticas ópticas EON. Comenzamos por describir en general las redes ópticas y en particular la arquitectura elástica. Describimos el problema de aprovisionamiento en estas redes; lo analizamos y realizamos aportes en sus dos etapas: ruteo y asignación de recursos. A lo largo de la tesis trabajamos con tres topologías de red de ejemplo (COST266, US24 y Argentina CORE) [28]. Todos los resultados mostrados en esta tesis fueron obtenidos mediante simulaciones o modelos computacionales.

En el Capítulo 3 estudiamos el problema de encontrar rutas parcialmente disjuntas con el objetivo de garantizar un cierto nivel de disponibilidad a costo mínimo. Realizamos una descripción formal del problema y propusimos un enfoque nuevo para el cálculo de la disponibilidad de un servicio en redes de alta disponibilidad basado en la enumeración de escenarios de falla relevantes. Mostramos que utilizando un conjunto de escenarios específicos, el error está acotado y que la cota se puede determinar con exactitud. Propusimos un modelo de programación lineal y un algoritmo basados en este enfoque y comparamos los resultados con la única opción disponible en la literatura que es el uso de la factorización. Comparamos el desempeño de las estrategias en las tres redes de ejemplo y mostramos que es posible encontrar caminos parcialmente disjuntos que garanticen cierto grado de disponibilidad minimizando el tiempo de cómputo utilizando esta estrategia de enumeración de escenarios de falla relevantes.

En el Capítulo 4 estudiamos el problema de la asignación de regeneración, modulación y espectro en redes elásticas ópticas. Nos centramos en particular en el problema de la selección de opción de regeneración que engloba la asignación de regeneración y modulación. En este contexto propusimos dos algoritmos TH-RA y UT-RA que se diferencian de los existentes en ser conscientes de los recursos disponibles. En particular el algoritmo UT-RA permite adaptar las soluciones al estado de la red y a los requerimientos de las demandas. Evaluamos estas estrategias en

las tres topologías de red de ejemplo, comparamos los resultados con las estrategias clásicas y con algoritmos más complejos existentes en la literatura. En todos los casos, las estrategias conscientes de los recursos permitieron obtener mejores resultados y en particular, el algoritmo UT-RA, permitió obtener mejoras no solamente en los niveles de bloqueo, si no que también permitió mejorar la justicia entre demandas de diferentes tipos.

Finalmente, en el Capítulo 5 estudiamos el impacto de los SBVTs en el aprovisionamiento en redes elásticas ópticas (EON). Mostramos que el uso de esta arquitectura no presenta ventajas desde el punto de vista de la probabilidad de bloqueo cuando se utilizan conexiones totalmente transparentes. Sin embargo, cuando se implementan conexiones translúcidas el uso de SBVTs permite contar con lo que llamamos regeneración compartida. El efecto de la regeneración compartida permite que a diferencia de lo que sucede en las redes equipadas con BVTs, el uso de regeneración siempre redunde en una disminución de la probabilidad de bloqueo incluso sin que esto signifique un incremento en el costo con respecto al caso *Transparente*. Mostramos este efecto utilizando una estrategia llamada MCF-RA que prioriza minimizar el número de portadoras utilizadas sobre la topología COST266. Para evaluar las ventajas de esta nueva arquitectura en el proceso de aprovisionamiento, adaptamos el algoritmo UT-RA y comparamos su comportamiento con la estrategia *Transparente*. Este algoritmo permitió reducir las probabilidades de bloqueo significativamente en las tres redes de ejemplo utilizadas independientemente de la disponibilidad de recursos.

Las flexibilidades y capacidades de configuración y reconfiguración que presentan las redes elásticas ópticas EON expanden las posibilidades para aumentar tanto la disponibilidad como la capacidad de los servicios transportados así como también acompañar las dinámicas cada vez más aceleradas que presentan. En este contexto, los aportes realizados tienden a explotar estas capacidades. El estudio y desarrollo de algoritmos que permitan hacer un uso óptimo de los recursos y garantizar la disponibilidad de los servicios es fundamental para acompañar la escala de las redes y las tendencias actuales de redes configuradas por software. De la misma manera, mantener los tiempos de cómputos acotados es de vital importancia para permitir que los procesos de aprovisionamiento puedan responder eficientemente a la dinámica de las demandas cada vez más cambiantes.

6.1 Perspectivas

En la actualidad se ha alcanzado el límite en prácticamente en todas las dimensiones de multiplexación de la transmisión óptica con excepción de la dimensión espacial. La comunidad que estudia la transmisión óptica está haciendo un gran esfuerzo para explotar esta nueva dimensión. Se han propuesto esquemas que utilizan fibras multimodo, fibras de pocos modos, fibras multinúcleo y esquemas de múltiples fibras en paralelo. Cada uno de estos esquemas impone restricciones ligeramente diferentes al aprovisionamiento de las demandas. no existe

un consenso aún acerca del mejor enfoque para aprovechar esta nueva dimensión. Es necesario evaluar las diferentes propuestas y su impacto a nivel de arquitectura de transpondedor y de nodo. En base a los diferentes esquemas y arquitecturas será necesario adaptar y crear algoritmos para el aprovisionamiento que permitan explotar de forma óptima esta nueva dimensión. Este es un área incipiente donde ya existen aportes ([8, 42, 86], por citar algunos recientes) en la cual se pueden realizar contribuciones en particular sobre el rol de la regeneración, que como se mostró en esta tesis, tiene el potencial de mejorar el uso de los recursos.

Por otra parte, el advenimiento de las redes definidas por software plantea un cambio en los insumos y recursos disponibles para los algoritmos de planificación y aprovisionamiento. La disponibilidad de información global de la red permite tomar decisiones en función de su impacto a nivel general. Además, las redes definidas por software al separar la capa de infraestructura de la capa de control y de la capa de aplicación permiten incrementar fuertemente el poder computacional disponible para los algoritmos y métodos de planificación y aprovisionamiento. En este contexto, se han empezado a proponer herramientas de aprendizaje automático [35] que permitan resolver problemas de optimización global que son demasiado complejos para resolverlos con métodos computacionales clásicos en tiempos razonables. En este sentido, ya hemos empezado a trabajar en métodos que combinan redes de grafos y esquemas de entrenamiento por refuerzos con el objetivo de resolver de forma conjunta el problema del ruteo y asignación de recursos. Esperamos que la aplicación de estas técnicas permitan mejorar los procesos de aprovisionamiento, permitiendo disminuir aún más las probabilidades de bloqueo y mejorar la respuesta al comportamiento dinámico de las demandas.

Apéndices



EL MODELO GN

Introducción

En esta tesis suponemos un escenario de transmisión sin compensación de dispersión. En este tipo de escenarios es posible utilizar modelos de propagación no lineal sobre fibra óptica basados en perturbaciones que no eran efectivos para modelar la propagación sobre sistemas compensados. Uno de los modelos basados en perturbaciones más extendido es el modelo GN [57] que ha demostrado ser simple y ser capaz de arrojar buenos resultados para el diseño y simulación. Este modelo se basa en considerar a la acumulación de del ruido producido por los efectos no lineales de la fibra aditivo y gaussiano. Este modelo toma tres asunciones principales, en primer lugar se asume que las no linealidades son relativamente chicas en comparación con la señal útil permitiendo utilizar las técnicas basadas en perturbaciones. En segundo lugar se asume que la señal transmitida se comporta estadísticamente como ruido gaussiano, esta suposición no se cumple cerca del emisor pero a medida de que la señal se propaga por el sistema no compensado tiende a tomar un comportamiento más cercano al gaussiano. La tercera asunción consiste en considerar que las interferencias producidas por las no linealidades se manifiesta a su vez como ruido gaussiano.

Bajo estas asunciones, el modelo GN provee una fórmula de referencia, llamada GNRF por sus siglas en inglés, que representa la densidad espectral de potencia de las interferencias no lineales al final del enlace. Tomando las siguientes simplificaciones:

1. Las señales transmitidas son de doble polarización
2. No hay cambios en el tipo de fibra a lo largo de un salto
3. Todos los saltos del enlace poseen las mismas características de fibra y longitud

4. La pérdida en cada salto, incluyendo el último, se compensa de forma exacta por medio de amplificación óptica

Es posible obtener una expresión simplificada para la densidad espectral de potencia de la interferencia no lineal al final del enlace según la ecuación A.1

$$(A.1) \quad G_{NLI}(f) = \frac{16}{27} \gamma^2 L_{eff}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_{WDM}(f_1) G_{WDM}(f_2) G_{WDM}(f_1 + f_2 - f) \rho(f_1, f_2, f) \chi(f_1, f_2, f) df_2 df_1$$

Donde γ es el coeficiente no lineal de la fibra en $W^{-1} km^{-1}$ y L_{eff} es la longitud efectiva del salto en km calculada como $L_{eff} = \frac{1 - e^{-2\alpha L_s}}{2\alpha}$ donde α es el coeficiente de pérdida en km^{-1} y L_s es la longitud del salto en km. $G_{WDM}(f)$ es la densidad espectral de potencia de la señal WDM en el punto de transmisión. Una interpretación física de esta expresión puede ser que la densidad espectral de potencia de la interferencia no lineal generada en el punto f , que es $G_{NLI}(f)$, es el resultado integrado de todos los infinitesimales productos de FWM que ocurren entre cualquier tripla de frecuencias de la señal transmitida f_1 , f_2 y $f_3 = f_1 + f_2 - f$. El coeficiente de integración $\rho(f_1, f_2, f)$ se puede entender como la eficiencia de modulación del FWM entre f_1 , f_2 y $f_1 + f_2 - f$ y es siempre un valor entre 0 y 1. El coeficiente $\chi(f_1, f_2, f)$ da cuenta de la acumulación de las interferencias por no linealidades a lo largo de los saltos en enlaces con múltiples saltos. Para más detalles sobre esta expresión consultar [57, 58].

En general, esta expresión no tiene una solución cerrada y debe ser resuelta utilizando métodos numéricos. Sin embargo, para ciertos casos específicos es posible obtener una solución analítica. En esta tesis utilizamos una serie de simplificaciones que permiten determinar la $G_{NLI}(f)$ de forma analítica. Asumimos:

- que cada enlace está compuesto por N_s saltos de iguales características de fibra y longitud L_s .
- que la pérdida en cada enlace es exactamente compensada, incluso en el último salto.
- que toda la banda C es utilizada por un número N_{ch} de canales de igual ancho y que existen la misma cantidad de canales a la izquierda y derecha del canal central.
- que todos los canales utilizan la misma tasa de símbolos.
- que el ancho de banda para contemplar la interferencia es siempre igual a la tasa de símbolos.
- que las diferentes interferencias se acumulan de forma incoherente.

Bajo todas estas suposiciones es posible expresar la SNR_{NL} al extremo del enlace como se muestra en la Ecuación A.2. Donde la potencia del ruido generado por emisiones espontáneas en los amplificadores para un salto (P_{ASE}^{1span}) se puede calcular como se muestra en la Ecuación A.3.

$$(A.2) \quad SNR_{NL} = \frac{P_{ch}}{(P_{ASE}^{1span} + P_{NLI}^{1span})N_s} = \frac{P_{ch}}{(P_{ASE}^{1span} + \eta^{1span}P_{ch}^3)N_s}$$

$$(A.3) \quad P_{ASE}^{1span} = h\nu F(\Gamma - 1)R_s$$

Despejando el valor de N_s que es el factor que nos interesa maximizar y remplazando SNR_{NL} por la SNR_{tgt} objetivo obtenemos:

$$(A.4) \quad N_s = \frac{P_{ch}}{(P_{ASE}^{1span} + \eta^{1span}P_{ch}^3)SNR_{tgt}}$$

Maximizando esta expresión podemos obtener el valor óptimo para la potencia de transmisión P_{ch}^{opt} :

$$(A.5) \quad P_{ch}^{opt} = \left(P_{ASE}^{1span} / (2\eta^{1span}) \right)^{1/3}$$

Asumiendo que se transmite con la potencia óptima, es posible calcular la cantidad de saltos máxima para el peor caso, que es la frecuencia central del espectro.

$$(A.6) \quad N_s^{max} = \frac{1}{3SNR_{tgt}} \left(\frac{4}{(P_{ASE}^{1span})^2 \eta^{1span}} \right)^{1/3}$$

Donde η^{1span} se puede aproximar por la siguiente expresión:

$$(A.7) \quad \eta^{1span} \approx \frac{8}{27} \frac{\gamma^2 L_{eff}^2}{\pi |\beta_2| R_s^2 L_{eff,a}} \operatorname{asinh} \left(\frac{\pi^2}{2} |\beta_2| L_{eff,a} R_s^2 N_{ch}^2 \frac{2 \frac{R_s}{\Delta f_{ch}}}{2} \right)$$

Teniendo en cuenta las Ecuaciones A.6 y A.7 es posible encontrar un valor aproximado de la máxima tasa de símbolos admisible para un enlace determinado conociendo el formato de modulación dado un objetivo de BER. Para una misma tasa de errores objetivo (BER), cada formato de modulación presentará un requerimiento de SNR_{tgt} diferente. La relación entre la SNR y el BER para cada formato de modulación pueden encontrarse en [59]. De esta manera es posible determinar cuál es la máxima tasa de bits que se puede lograr sobre una portadora dado un conjunto de posibles modulaciones. Para más información acerca de la obtención de estas expresiones ver [58].

Referencia de símbolos:

1. α : coeficiente de pérdida en la fibra [1/km]
2. Γ : ganancia de potencia en grupo de los amplificadores EDFA
3. β_2 : coeficiente de dispersión [ps^2/km]
4. γ : coeficiente no lineal de la fibra[1/(W km)]
5. L_s : longitud del salto [km]
6. L_{eff} : longitud efectiva del salto [km]
7. $L_{eff,\alpha} = 1/(2\alpha)$ [km]
8. N_s : número total de saltos
9. R_s : tasa de símbolos [Baud]
10. $\Delta_{f_{ch}}$ espaciado de canales.

Escenario utilizado en esta tesis

Para todas las simulaciones asumimos el uso de fibras SMF con amplificación óptica por EDFA cada 80 km, $\alpha = 0.2$ dB/km, $D = 17$ ps/(nm km), $\gamma = 1.2$ 1/(W km), una figura de ruido de 5 dB, un BER objetivo de 1×10^{-2} , una tasa de símbolos máxima de 50 GBaud y una sobretasa del 25% para el FEC. En base a estos valores y las simplificaciones mencionadas anteriormente mostramos, en la Figura A.1, el *baudrate* y el *bitrate* alcanzables sobre una portadora para los seis formatos de modulación que consideramos en esta tesis (DP-BPSK, DP-QPSK, DP-8QAM, DP-16QAM, DP-32QAM y DP-64QAM).

Cómo puede verse en la Figura A.1-A la tasa de símbolos máxima para todos los formatos de modulación es 50 GBaud. Sin embargo, la tasa de símbolos cae rápidamente a partir de un umbral de distancia. Mientras más complejo es el formato de modulación antes sucede esta caída. Por ejemplo, es posible transmitir a 50 GBaud utilizando DP-64QAM sólo hasta los 400 km aproximadamente, luego la tasa de símbolos alcanzable cae rápidamente. En cambio, si utilizamos DP-8QAM es posible transmitir a 50 GBaud hasta los 4000 km. Esta diferencia se ve reflejada en la Figura A.1-B, en donde es posible apreciar que el *bitrate* alcanzable depende del formato de modulación pero también de la distancia. Utilizando DP-64QAM es posible transmitir 480 Gbps hasta algo menos que 400 km, utilizando DP-32QAM es posible transmitir 400 Gbps hasta aproximadamente 800 km, con DP-16QAM es posible transmitir 320 Gbps hasta por 1800 km, con DP-8QAM es posible transmitir 240 Gbps hasta una distancia de 400 km, con DP-QPSK es posible transmitir 160 Gbps hasta una distancia de algo menos de 7000 km y para este ejemplo

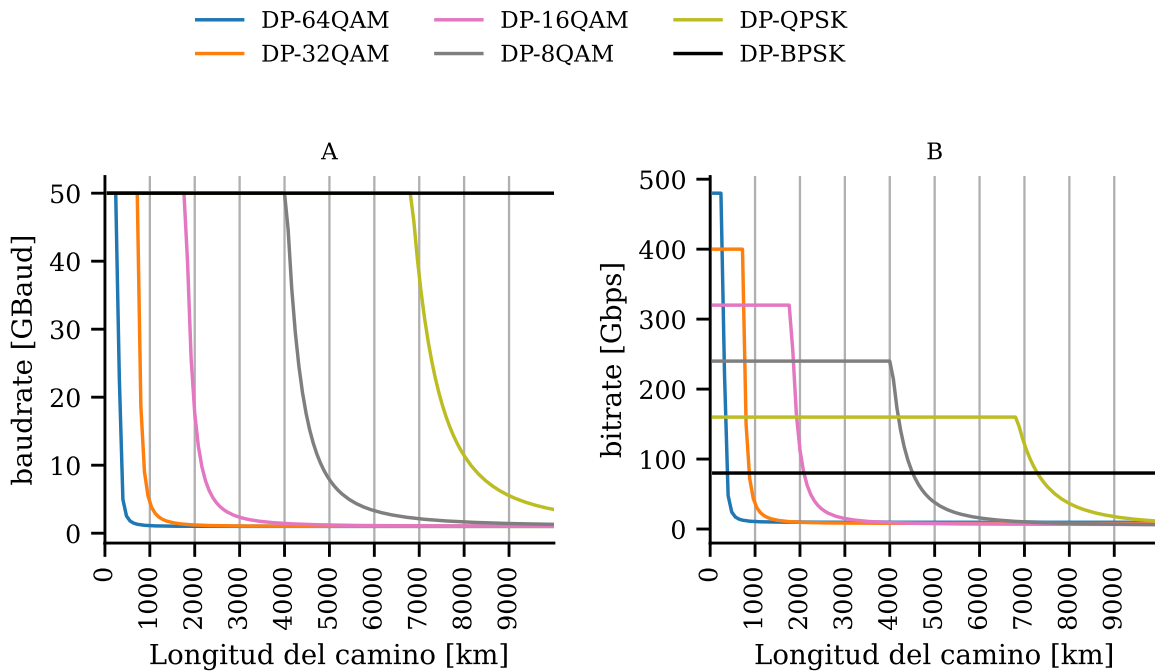


Figura A.1: *baudrate* y *bitrate* en función de la distancia de transmisión para un transpondedor de una portadora con tasa de símbolos máxima de 50 GBaud y 6 formatos de modulación (DP-BPSK, DP-QPSK, DP-8QAM, DP-16QAM, DP-32QAM y DP-64QAM). Asumiendo el modelo simplificado basado en el modelo GN descrito en este apéndice.

es posible alcanzar los 10000 km con 80 Gbps utilizando DP-BPSK. En base a estos resultados es posible elaborar un criterio de selección de formato de modulación en base a la distancia de transmisión. En nuestro caso seleccionamos siempre el formato de modulación que permite obtener el mayor *bitrate* para la distancia de transmisión requerida. El enfoque general se puede encontrar en [57] y [58] y una aplicación con resultados similares se puede encontrar en [56].

Si bien todas las simplificaciones asumidas hacen que los valores de distancia de transmisión calculados se alejen de la realidad, esta diferencia se manifiesta para todos los formatos de modulación y se convierte en un sesgo que afecta a todas las estrategias de asignación de recursos por igual. El objetivo de las simulaciones realizadas es el de comparar las diferentes estrategias entre sí en términos relativos y no en términos absolutos. Es por esto que, consideramos que este modelo, con estas simplificaciones es adecuado para el estudio realizado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Itu-t recommendation “g.694.1 : Spectral grids for wdm applications: Dwdm frequency grid”*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/en>.
- [2] S. ABBOTT, *Review of 20 years of undersea optical fiber transmission system development and deployment since tat-8*, in 2008 34th European Conference on Optical Communication, IEEE, 2008, pp. 1–4.
- [3] G. P. AGRAWAL, *Optical communication: its history and recent progress*, in Optics in Our Time, Springer, Cham, 2016, pp. 177–199.
- [4] E. AGRELL, M. KARLSSON, A. CHRAPLYVY, D. J. RICHARDSON, P. M. KRUMMRICH, P. WINZER, K. ROBERTS, J. K. FISCHER, S. J. SAVORY, B. J. EGGLETON, ET AL., *Roadmap of optical communications*, Journal of Optics, 18 (2016), p. 063002.
- [5] M. AIBIN AND K. WALKOWIAK, *Adaptive modulation and regenerator-aware dynamic routing algorithm in elastic optical networks*, in Communications (ICC), 2015 IEEE International Conference on, IEEE, 2015, pp. 5138–5143.
- [6] M. AYERS, *Telecommunications System Reliability Engineering, Theory, and Practice*, IEEE Press Series on Networks and Services Management, Wiley, 2012.
- [7] S. AZODOLMOLKY, M. KLINKOWSKI, E. MARIN, D. CAREGLIO, J. S. PARETA, AND I. TOMKOS, *A Survey on Physical Layer Impairments Aware Routing and Wavelength Assignment Algorithms in Optical Networks*, Computer Networks, 53 (2009), pp. 926–944.
- [8] A. A. BEYRAGH, A. G. RAHBAR, S.-M. H. GHAZVINI, AND M. NICKRAY, *If-rsca: intelligent fragmentation-aware method for routing, spectrum and core assignment in space division multiplexing elastic optical networks (sdm-eon)*, Optical Fiber Technology, 50 (2019), pp. 284–301.
- [9] R. BHANDARI, *Survivable networks: algorithms for diverse routing*, Springer Science & Business Media, 1999.
- [10] C. CAVDAR, L. SONG, M. TORNATORE, AND B. MUKHERJEE, *Holding-Time-Aware and Availability-Guaranteed Connection Provisioning in Optical WDM Mesh Networks*, in

- 2007 International Symposium on High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies, IEEE, 2007, pp. 1–7.
- [11] I. CERUTTI, F. MARTINELLI, N. SAMBO, F. CUGINI, AND P. CASTOLDI, *Trading regeneration and spectrum utilization in code-rate adaptive flexi-grid networks*, *Journal of Lightwave Technology*, 32 (2014), pp. 3894–3901.
- [12] B. C. CHATTERJEE, S. BA, AND E. OKI, *Fragmentation problems and management approaches in elastic optical networks: A survey*, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20 (2017), pp. 183–210.
- [13] B. C. CHATTERJEE, N. SARMA, AND E. OKI, *Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial*, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17 (2015), pp. 1776–1800.
- [14] D. A. CHAVES, M. A. CAVALCANTE, H. A. PEREIRA, AND R. C. ALMEIDA, *A case study of regenerator placement and regenerator assignment in dynamic translucent elastic optical networks*, in *Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2016 18th International Conference on, IEEE, 2016, pp. 1–4.
- [15] D. A. CHAVES, E. F. DA SILVA, C. J. BASTOS-FILHO, H. A. PEREIRA, AND R. C. ALMEIDA, *Heuristic algorithms for regenerator assignment in dynamic translucent elastic optical networks*, in *Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2015 17th International Conference on, IEEE, 2015, pp. 1–4.
- [16] A. CHRAPLYVY, A. GNAUCK, R. TKACH, AND R. DEROSIER, *8* 10 gb/s transmission through 280 km of dispersion-managed fiber*, *IEEE photonics technology letters*, 5 (1993), pp. 1233–1235.
- [17] M. CLOUQUEUR AND W. D. GROVER, *Availability Analysis of Span-Restorable Mesh Networks*, *Selected Areas in Communications*, *IEEE Journal on*, 20 (2002), pp. 810–821.
- [18] E. F. DA SILVA, R. C. ALMEIDA, H. A. PEREIRA, AND D. A. CHAVES, *Assessment of novel regenerator assignment strategies in dynamic translucent elastic optical networks*, *Photonic Network Communications*, (2019), pp. 1–16.
- [19] —, *Assessment of novel regenerator assignment strategies in dynamic translucent elastic optical networks*, *Photonic Network Communications*, 39 (2020), pp. 54–69.
- [20] M. DALLAGLIO, T. ZAMI, N. SAMBO, A. GIORGETTI, A. PAGANO, E. RICCARDI, AND P. CASTOLDI, *Add and drop architectures for multi-carrier transponders in eons*, *Journal of Optical Communications and Networking*, 8 (2016), pp. A12–A22.

-
- [21] A. DAS, *Maximizing Profit Using SLA-Aware Provisioning*, in 2012 IEEE Network Operations and Management Symposium, IEEE, 2012, pp. 393–400.
- [22] E. W. DIJKSTRA ET AL., *A note on two problems in connexion with graphs*, *Numerische mathematik*, 1 (1959), pp. 269–271.
- [23] C. R. DOERR AND K. OKAMOTO, *Advances in silica planar lightwave circuits*, *Journal of lightwave technology*, 24 (2006), pp. 4763–4789.
- [24] D. EPPSTEIN, *Finding the k shortest paths*, *SIAM Journal on computing*, 28 (1998), pp. 652–673.
- [25] J. P. FERNÁNDEZ-PALACIOS, V. LÓPEZ, B. DE LA CRUZ, O. GERSTEL, N. SAMBO, AND E. RICCARDI, *Sliceable bandwidth variable transponders*, in *Elastic Optical Networks*, Springer, 2016, pp. 159–188.
- [26] J. M. FINOCHIETTO, M. GARRICH, AND A. BIANCO, *On provisioning strategies in translucent elastic optical networks with flexible regeneration and superchannel transmission*, in *High Performance Switching and Routing (HPSR), 2017 IEEE 18th International Conference on*, IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [27] O. GERSTEL, M. JINNO, A. LORD, AND S. B. YOO, *Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer?*, *IEEE Communications Magazine*, 50 (2012).
- [28] N. GONZALEZ-MONTORO, *Eon topologies for net2plan*.
https://github.com/nehuengonzalez/eon_topologies, 2020.
- [29] N. GONZALEZ-MONTORO, R. CHERINI, AND J. M. FINOCHIETTO, *A multiple-link failures enumeration approach for availability analysis on partially disjoint paths*, in *DRCN 2017-Design of Reliable Communication Networks; 13th International Conference, VDE*, 2017, pp. 1–8.
- [30] N. GONZALEZ-MONTORO AND J. M. FINOCHIETTO, *Survivability analysis on non-triconnected optical networks under dual-link failures*, in *2017 XLIII Latin American Computer Conference (CLEI), IEEE*, 2017, pp. 1–9.
- [31] N. GONZALEZ-MONTORO, J. M. FINOCHIETTO, AND A. BIANCO, *Optimal provisioning strategies for translucent elastic optical networks*, in *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), IEEE*, 2018, pp. 1–7.
- [32] ———, *Translucent provisioning in elastic optical networks with sliceable bandwidth variable transponders*, in *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), IEEE*, 2018, pp. 1–6.

- [33] W. D. GROVER, *High Availability Path Design in Ring-Based Optical Networks*, IEEE/ACM Transactions on Networking, 7 (1999), pp. 558–574.
- [34] W. D. GROVER AND D. STAMATELAKIS, *Cycle-oriented distributed preconfiguration: Ring-like speed with mesh-like capacity for self-planning network restoration*, in ICC'98. 1998 IEEE International Conference on Communications. Conference Record. Affiliated with SUPERCMM'98 (Cat. No. 98CH36220), vol. 1, IEEE, 1998, pp. 537–543.
- [35] R. GU, Z. YANG, AND Y. JI, *Machine learning for intelligent optical networks: A comprehensive survey*, Journal of Network and Computer Applications, 157 (2020), p. 102576.
- [36] H. GUO, Y. LI, L. LI, AND G. SHEN, *Adaptive modulation and regeneration-aware routing and spectrum assignment in sbpp-based elastic optical networks*, IEEE Photonics Journal, 9 (2017), pp. 1–15.
- [37] A. C. HART JR, R. G. HUFF, AND K. L. WALKER, *Method of making a fiber having low polarization mode dispersion due to a permanent spin*, Mar. 29 1994. US Patent 5,298,047.
- [38] M. JINNO, H. TAKARA, B. KOZICKI, Y. TSUKISHIMA, Y. SONE, AND S. MATSUOKA, *Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies*, IEEE Communications Magazine, 47 (2009).
- [39] R. KERDOCK AND D. WOLAVER, *Atlanta fiber system experiment: results of the atlanta experiment*, Bell System Technical Journal, 57 (1978), pp. 1857–1879.
- [40] M. KLINKOWSKI, *On the effect of regenerator placement on spectrum usage in translucent elastic optical networks*, in Transparent Optical Networks (ICTON), 2012 14th International Conference on, IEEE, 2012, pp. 1–6.
- [41] M. KLINKOWSKI AND K. WALKOWIAK, *On performance gains of flexible regeneration and modulation conversion in translucent elastic optical networks with superchannel transmission*, Journal of lightwave technology, 34 (2016), pp. 5485–5495.
- [42] M. KLINKOWSKI AND K. WALKOWIAK, *An efficient optimization framework for solving rssa problems in spectrally and spatially flexible optical networks*, IEEE/ACM Transactions on Networking, 27 (2019), pp. 1474–1486.
- [43] KLINKOWSKI, MIROSLAW AND WALKOWIAK, KRZYSZTOF, *Performance analysis of flexible regeneration and modulation conversion in elastic optical networks*, in Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, 2017, pp. Th2A–13.

- [44] S. LIBRARY, *Cost266 network topology*.
<http://sndlib.zib.de>.
- [45] V. Y. LIU AND Z. SUI, *Finding Partially Disjoint Routes for Dual Fiber-Cut Protection on Bi-Connected Networks*, in National Fiber Optic Engineers Conference, Optical Society of America, 2012, pp. NW3K–7.
- [46] V. Y. LIU AND D. TIPPER, *Spare capacity allocation using shared backup path protection for dual link failures*, *Computer Communications*, 36 (2013), pp. 666–677.
- [47] Y. LIU, D. TIPPER, AND P. SIRIPONGWUTIKORN, *Approximating Optimal Spare Capacity Allocation by Successive Survivable Routing*, *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 13 (2005), pp. 198–211.
- [48] V. LÓPEZ, L. VELASCO, ET AL., *Elastic Optical Networks*, Springer, 2016.
- [49] R. J. MEARS, L. REEKIE, I. JAUNCEY, AND D. N. PAYNE, *Low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54 μm* , *Electronics Letters*, 23 (1987), pp. 1026–1028.
- [50] D. A. MELLO, D. A. SCHUPKE, AND H. WALDMAN, *A Matrix-Based Analytical Approach to Connection Unavailability Estimation in Shared Backup Path Protection*, *IEEE Communications Letters*, 9 (2005), pp. 844–846.
- [51] E. F. MOORE, *The shortest path through a maze*, in Proc. Int. Symp. Switching Theory, 1959, 1959, pp. 285–292.
- [52] F. MOSKOWITZ, *The Analysis of Redundancy Networks*, *Transactions of the American institute of electrical engineers, part i: communication and electronics*, 77 (1958), pp. 627–632.
- [53] L. NADAL, J. M. FABREGA, M. S. MOREOLO, R. CASELLAS, R. MUÑOZ, L. RODRÍGUEZ, R. VILALTA, F. J. VÍLCHEZ, AND R. MARTÍNEZ, *Sdn-enabled sliceable transceivers in disaggregated optical networks*, *Journal of Lightwave Technology*, 37 (2019), pp. 6054–6062.
- [54] C. OU, J. ZHANG, H. ZANG, L. H. SAHASRABUDDHE, AND B. MUKHERJEE, *Near-optimal approaches for shared-path protection in wdm mesh networks*, in IEEE International Conference on Communications, 2003. ICC'03., vol. 2, IEEE, 2003, pp. 1320–1324.
- [55] S. PACHNICKE, T. PASCHENDA, AND P. M. KRUMMRICH, *Physical impairment based regenerator placement and routing in translucent optical networks*, in Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, 2008, p. OWA2.
- [56] E. PAZ AND G. SAAVEDRA, *Maximum transmission reach for optical signals in elastic optical networks employing band division multiplexing*, arXiv preprint arXiv:2011.03671, (2020).

- [57] P. POGGIOLINI, *The gn model of non-linear propagation in uncompensated coherent optical systems*, Journal of Lightwave Technology, 30 (2012), pp. 3857–3879.
- [58] P. POGGIOLINI, G. BOSCO, A. CARENA, V. CURRI, Y. JIANG, AND F. FORGHIERI, *The gn-model of fiber non-linear propagation and its applications*, Journal of lightwave technology, 32 (2013), pp. 694–721.
- [59] PROAKIS, *Digital Communications 5th Edition*, McGraw Hill, 2007.
- [60] G. RAYBON, A. ADAMIECKI, P. WINZER, C. XIE, A. KONCZYKOWSKA, F. JORGE, J.-Y. DUPUY, L. L. BUHL, C. SETHUMADHAVAN, S. DRAVING, ET AL., *Single-carrier 400g interface and 10-channel wdm transmission over 4800 km using all-etdm 107-gbaud pdm-qpsk*, in Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, 2013, pp. PDP5A–5.
- [61] D. RICHARDSON, J. FINI, AND L. E. NELSON, *Space-division multiplexing in optical fibres*, Nature Photonics, 7 (2013), p. 354.
- [62] A. SALEH ET AL., *Islands of transparency-an emerging reality in multiwavelength optical networking*, in IEEE/LEOS summer topical meeting on broadband optical networks and technologies, 1998, p. 36.
- [63] N. SAMBO, D. ANTONIO, C. PORZI, V. VERCESI, M. IMRAN, F. CUGINI, A. BOGONI, L. POTÌ, P. CASTOLDI, ET AL., *Sliceable transponder architecture including multiwavelength source*, IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 6 (2014), pp. 590–600.
- [64] N. SAMBO, P. CASTOLDI, A. D’ERRICO, E. RICCARDI, A. PAGANO, M. S. MOREOLO, J. M. FABREGA, D. RAFIQUE, A. NAPOLI, S. FRIGERIO, ET AL., *Next generation sliceable bandwidth variable transponders*, IEEE Communications Magazine, 53 (2015), pp. 163–171.
- [65] X. SHAO, Y.-K. YEO, Z. XU, X. CHENG, AND L. ZHOU, *Shared-path protection in ofdm-based optical networks with elastic bandwidth allocation*, in Optical Fiber Communication Conference, Optical Society of America, 2012, pp. OTh4B–4.
- [66] G. SHEN, H. GUO, AND S. K. BOSE, *Survivable elastic optical networks: survey and perspective*, Photonic Network Communications, 31 (2016), pp. 71–87.
- [67] J. M. SIMMONS, *Optical network design and planning*, Springer, 2014.
- [68] J. P. STERBENZ, D. HUTCHISON, E. K. ÇETINKAYA, A. JABBAR, J. P. ROHRER, M. SCHÖLLER, AND P. SMITH, *Resilience and Survivability in Communication Networks:*

- Strategies, principles, and Survey of Disciplines*, Computer Networks, 54 (2010), pp. 1245–1265.
- [69] J. SUURBALLE, *Disjoint paths in a network*, Networks, 4 (1974), pp. 125–145.
- [70] N. TOKAS, A. KUMAR, AND K. KAUR, *Optimum regenerator placement in wdm optical network*, International Journal of Engineering Science, 10839 (2017).
- [71] I. TOMKOS, S. AZODOLMOLKY, J. SOLE-PARETA, D. CAREGLIO, AND E. PALKOPOULOU, Proceedings of the IEEE, 102 (2014), pp. 1317–1337.
- [72] K. WALKOWIAK, M. KLINKOWSKI, AND P. LECHOWICZ, *Dynamic routing in spectrally spatially flexible optical networks with back-to-back regeneration*, Journal of Optical Communications and Networking, 10 (2018), pp. 523–534.
- [73] C. WANG, G. SHEN, AND S. K. BOSE, *Distance adaptive dynamic routing and spectrum allocation in elastic optical networks with shared backup path protection*, Journal of Lightwave Technology, 33 (2015), pp. 2955–2964.
- [74] X. WANG, M. BRANDT-PEARCE, AND S. SUBRAMANIAM, *Impact of wavelength and modulation conversion on translucent elastic optical networks using milp*, Journal of Optical Communications and Networking, 7 (2015), pp. 644–655.
- [75] A. WILLNER, *Several historical articles in this millennium issue cover the development of lasers and optical fibers*, IEEE J Sel Top Quant Electron, 6 (2000), pp. 827–1513.
- [76] P. WINZER, A. GNAUCK, G. RAYBON, M. SCHNECKER, AND P. PUPALAIKIS, *56-gbaud pdm-qpsk: coherent detection and 2,500-km transmission*, in 2009 35th European Conference on Optical Communication, vol. 2009, IEEE, 2009, pp. 1–2.
- [77] P. J. WINZER, D. T. NEILSON, AND A. R. CHRAPLYVY, *Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years*, Optics express, 26 (2018), pp. 24190–24239.
- [78] M. XIA, M. TORNATORE, C. U. MARTEL, AND B. MUKHERJEE, *Risk-Aware Provisioning for Optical WDM Mesh Networks*, IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 19 (2011), pp. 921–931.
- [79] W. XIE, J. P. JUE, X. WANG, Q. ZHANG, Q. SHE, P. PALACHARLA, AND M. SEKIYA, *Regenerator site selection for mixed line rate optical networks with flexible routing*, in Optical Network Design and Modeling (ONDM), 2012 16th International Conference on, IEEE, 2012, pp. 1–6.

- [80] —, *Cost-optimized design of flexible-grid optical networks considering regenerator site selection*, in Global Communications Conference (GLOBECOM), 2013 IEEE, IEEE, 2013, pp. 2358–2363.
- [81] S. YANG AND F. KUIPERS, *Impairment-aware routing in translucent spectrum-sliced elastic optical path networks*, in Networks and Optical Communications (NOC), 2012 17th European Conference on, IEEE, 2012, pp. 1–6.
- [82] J. Y. YEN, *Finding the K Shortest Loopless Paths in a Network*, management Science, 17 (1971), pp. 712–716.
- [83] H. ZHANG AND O. YANG, *Finding protection cycles in dwdm networks*, in 2002 IEEE International Conference on Communications. Conference Proceedings. ICC 2002 (Cat. No. 02CH37333), vol. 5, IEEE, 2002, pp. 2756–2760.
- [84] J. ZHANG, K. ZHU, H. ZANG, N. S. MATLOFF, AND B. MUKHERJEE, *Availability-Aware Provisioning Strategies for Differentiated Protection Services in Wavelength-Convertible WDM Mesh Networks*, IEEE/ACM Transactions on Networking, 15 (2007), pp. 1177–1190.
- [85] J. ZHAO AND S. SUBRAMANIAM, *QoS-and SLA-Aware Survivable Resource Allocation in Translucent Optical Networks*, in 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), IEEE, 2015, pp. 1–6.
- [86] Y. ZHAO, L. HU, R. ZHU, X. YU, Y. LI, W. WANG, AND J. ZHANG, *Crosstalk-aware spectrum defragmentation by re-provisioning advance reservation requests in space division multiplexing enabled elastic optical networks with multi-core fiber*, Optics express, 27 (2019), pp. 5014–5032.
- [87] D. ZHOU AND S. SUBRAMANIAM, *Survivability in optical networks*, IEEE network, 14 (2000), pp. 16–23.