



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN



# TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

## **Dimensionado y análisis tecno-económico de redes ópticas elásticas.**

**AUTOR:** SARA FERNÁNDEZ ATIENZA.

**TUTORES:** IGNACIO DE MIGUEL JIMÉNEZ  
RAMÓN J. DURÁN BARROSO.

VALLADOLID, SEPTIEMBRE DE 2016



## **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

---

**TÍTULO:** Dimensionado y análisis tecno-económico de redes ópticas elásticas.  
**AUTOR:** Dña. Sara Fernández Atienza  
**TUTORES:** D. Ignacio de Miguel Jiménez  
D. Ramón J. Durán Barroso  
**DEPARTAMENTO:** Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática

---

## **TRIBUNAL**

---

**PRESIDENTE :** Dña. Patricia Fernández del Reguero  
**SECRETARIO :** D. Javier Aguiar Pérez  
**VOCAL :** Dña. María Jesús Verdú Pérez  
**PRESIDENTE SUPLENTE :** D. Juan Ignacio Asensio Pérez  
**SECRETARIO SUPLENTE:** Dña. Luisa María Regueras Santos  
**VOCAL SUPLENTE:** D. Juan Pablo de Castro Fernández

---



## Resumen de TFM

Para un mejor aprovechamiento de las redes ópticas se ha planteado la implementación de las redes ópticas elásticas. Dichas redes se caracterizan por dividir el espectro en *slots* de menor tamaño que en las redes convencionales WDM, de manera que se aprovecha el ancho de banda que se estaba desperdiciando en este tipo de redes y además se permite la utilización de un conjunto variable de subportadoras a la hora de establecer una conexión.

El objetivo del TFM es comparar el uso de transceptores homogéneos y heterogéneos (es decir, capaces de generar un solo tipo de modulación o varios tipos) así como distintos algoritmos de *traffic grooming* en redes ópticas elásticas desde un punto de vista tecno-económico. Los algoritmos de *traffic grooming* determinan cómo cursar una petición de envío de tráfico entre dos nodos de la red: si estableciendo una nueva conexión óptica entre dichos nodos, si utilizando la capacidad remanente en conexiones ópticas ya establecidas, o de forma híbrida, usando la capacidad remanente en ciertas conexiones y estableciendo otras nuevas. Distintos algoritmos hacen distinto uso de los recursos de la red y dan lugar a distintos niveles de prestaciones. Por tanto, el objetivo ha sido comparar, para un mismo nivel de prestaciones en términos de probabilidad de bloqueo de ancho de banda, qué combinación de tipo de transceptor y algoritmo resulta más económico.

## Palabras clave

Redes ópticas elásticas, *traffic grooming*, capex, opex, transpondedor, nodos OXC, nodos IP/MPLS, amplificadores, *slots*, formato de modulación.



## **Abstract**

It has been proposed the deployment of elastic optical networks in order to make a better use of the optical networks. These networks are characterized by dividing the spectrum into smaller slots than in conventional WDM networks; in a manner that bandwidth which was wasted in such networks is now used. Furthermore, it is allowed the use of a variable number of subcarriers when establishing a connection.

The aim of this Master Thesis is to compare, from a techno-economic point of view, the use of homogeneous and heterogeneous transceivers (i.e., capable of generating a single modulation format or several ones) as well as different traffic grooming algorithms in elastic optical networks. Traffic grooming algorithms determine how to handle traffic requests between two network nodes: if establishing a new optical connection (lightpath) between them, if using the remaining capacity in already existing optical connections, or in a hybrid way, using the remaining capacity in certain connections and establishing new ones. Different algorithms make a different use of network resources and lead to different performance levels. Hence, the aim has been to compare, for the same level of performance in terms of bandwidth blocking ratio, which combination of type of transceiver and algorithm is the most economic one.

## **Keywords**

Elastic optical networking, *traffic grooming*, capex, opex, transponder, Optical Cross-Connect (OXC) node, IP/MPLS node, amplifiers, *slots*, modulation format.





## **Agradecimientos**

Me gustaría aprovechar estas líneas para dedicar este proyecto a los que con cariño y paciencia me han acompañado a lo largo del duro camino por la Universidad de Valladolid.

Quiero mostrar mi más sincero agradecimiento a Ignacio de Miguel Jiménez por el tiempo dedicado a lo largo de mis últimos años de estudio en la ETSIT, en los que he podido contar con su conocimiento, constancia, energía, orientación y apoyo. Sin su atención y dedicación, mi paso por la Universidad no hubiera sido el mismo.

No querría pasar por alto la oportunidad de agradecer a todos aquellos docentes y alumnos de la ETSIT, que de una u otra manera han formado parte de este trabajo, estando siempre en disposición de ayudar y resolver aquellos problemas que se fueron presentando a lo largo del estudio.

Agradecer en todo momento a mi familia, amigos y a esa persona especial, que han sido el ánimo y la fuerza durante todo el tiempo de estudio, aun cuando el camino parecería no llegar a su final.

Por último, agradecer a la Junta de Castilla y León, pues una parte del material utilizado para realizar este trabajo ha sido financiado parcialmente por la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León (proyecto ESTELA, referencia VA353A11-2). También agradecer la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad (TEC2014-53071-C3-2-P y TEC2015-71932-REDT).

A todos, muchas gracias.



*Cualquier tecnología  
suficientemente avanzada es  
indistinguible de la magia.*

*Arthur C. Clarke*



# Índice

---

## Contenido

Índice de figuras.....	15
Índice de tablas .....	17
<b>Capítulo I. Introducción .....</b>	<b>21</b>
<b>Capítulo II. Fundamentos de Redes Ópticas Elásticas .....</b>	<b>25</b>
1. Definición de redes ópticas elásticas .....	25
2. Equipamiento de la capa IP .....	26
3. Equipamiento de la capa óptica .....	27
4. Diseño de redes ópticas elásticas .....	27
5. Análisis de capex y opex.....	28
<b>Capítulo III. Contexto del estudio realizado .....</b>	<b>29</b>
1. Topología de la red de simulación.....	29
2. Algoritmo de <i>traffic grooming</i> .....	30
3. Escenarios de simulación .....	35
4. Modos de operación de simulación .....	37
<b>Capítulo IV. Modelo de costes tecno-económicos en redes elásticas.....</b>	<b>39</b>
1. Costes de Capital (capex).....	39
2. Costes debido al uso y funcionamiento de la red (opex) .....	44
<b>Capítulo V. Análisis tecno-económico de una red óptica elástica .....</b>	<b>51</b>
1. Aspectos previos.....	51
2. Primer estudio: Estudio del impacto del tipo de transpondedor y de los algoritmos de <i>traffic grooming</i> sin dimensionado previo.....	51
3. Segundo estudio: Estudio del impacto del tipo de transpondedor y de los algoritmos de <i>traffic grooming</i> con dimensionado previo.....	55
<b>Capítulo VI. Conclusiones y líneas futuras de trabajo .....</b>	<b>65</b>

<b>Anexo. Desarrollo del simulador en OMNeT++ .....</b>	<b>67</b>
1. Funcionamiento del simulador basado en OMNET++ .....	67
2. Modos de operación del simulador .....	69
3. Estructuras de datos y tablas más relevantes .....	70
4. Función “ <i>calculo_opex</i> ” .....	74
5. Función “ <i>calculo_capex</i> ” .....	76
6. Función “ <i>calculo_opex_alquiler</i> ” .....	76
7. Función “ <i>calculo_media_ponderada</i> ” .....	77
8. Portabilidad de las funciones .....	78
<b>Bibliografía .....</b>	<b>79</b>

# Índice de figuras

---

## Contenido

<b>Figura 1.</b> Diferencia entre la asignación de espectro mediante WDM y FLEXGRID. En la tecnología WDM el ancho de banda es fijo, mientras que en la tecnología FLEXGRID se utilizan subportadoras de tamaño fijo que se solapan de manera que el ancho de banda total es variable. ....	26
<b>Figura 2.</b> Establecimiento de un <i>lightpath</i> entre el nodo origen y destino.....	28
<b>Figura 3.</b> Red de simulación para el estudio del capex y opex.....	29
<b>Figura 4.</b> Estado de la red.....	31
<b>Figura 5.</b> Grafo auxiliar de la red en el cual se puede ver la estructura de la capa eléctrica y espectral. ....	31
<b>Figura 6.</b> Grafo auxiliar con el establecimiento de un nuevo <i>lightpath</i> entre A y C. ....	32
<b>Figura 7.</b> Establecimiento de una nueva conexión entre A y C mediante el establecimiento de un nuevo <i>lightpath</i> .....	32
<b>Figura 8.</b> Grafo auxiliar con el uso de un <i>lightpath</i> ya establecido entre A y B y el establecimiento de un nuevo <i>lightpath</i> entre B y C. ....	33
<b>Figura 9.</b> Establecimiento de una nueva conexión entre A y C mediante el uso de un <i>lightpath</i> ya establecido y el establecimiento de un nuevo <i>lightpath</i> . ....	33
<b>Figura 10.</b> Diferencias entre <i>lightpaths</i> establecidos sin reservar espectro (a) y con reserva de espectro (b). ....	35
<b>Figura 11.</b> Capacidad máxima de un <i>lightpath</i> y de los <i>slots</i> que contiene. ....	35
<b>Figura 12.</b> Modelos de capex de un nodo IP/MPLS en función del número de puertos. Se muestra en azul el modelo lineal de dos tramos (así como los datos originales de la tabla) y en rojo el modelo lineal pasando por el origen. ....	43
<b>Figura 13.</b> Diferentes probabilidades de bloqueo de ancho de banda para un escenario con un solo formato de modulación, asumiendo medio físico ideal. ....	52
<b>Figura 14.</b> Diferentes probabilidades de bloqueo de ancho de banda para un escenario con un solo formato de modulación, asumiendo medio físico real. ....	53
<b>Figura 15.</b> BBR para diferentes políticas en un escenario heterogéneo asumiendo un medio físico real. Para fines comparativos también se muestran los resultados de las políticas y formatos de modulación más eficaces en términos de BBR para los escenarios homogéneos (sólo se representan cargas de alto tráfico). ....	54
<b>Figura 16.</b> OPEX para las diferentes políticas que asumen un medio físico realista (todos los resultados mostrados cumplen esa $BBR < 10^{-3}$ ). ....	55

<b>Figura 17.</b> BBR para diferentes políticas, tanto en un escenario homogéneo como heterogéneo, asumiendo un medio físico realista. ....	57
<b>Figura 18.</b> BBR Media para cada dimensionado de recursos con variación de cargas para un algoritmo LB-SR y modulación QPSK. ....	58
<b>Figura 19.</b> BBR Media para cada dimensionado de recursos con variación de cargas para un algoritmo LB-SR y modulación 16QAM. ....	58
<b>Figura 20.</b> BBR Media para cada dimensionado de recursos con variación de cargas para un algoritmo LB-SR y modulación 64QAM. ....	59
<b>Figura 21.</b> BBR Media para cada dimensionado de recursos con variación de cargas para un algoritmo MinHops-SR/LB-SR.....	59
<b>Figura 22.</b> BBR Media para cada dimensionado de recursos con variación de cargas para un algoritmo LB-SR/LB-SR. ....	60
<b>Figura 23.</b> BBR Media para cada dimensionado de recursos con variación de cargas para un algoritmo MinLPs-SR/LB-SR.....	60
<b>Figura 24.</b> Capex para diferentes políticas, tanto en un escenario homogéneo como heterogéneo, asumiendo un medio físico realista. ....	61
<b>Figura 25.</b> Opex para diferentes políticas, tanto en un escenario homogéneo como heterogéneo, asumiendo un medio físico realista. ....	62
<b>Figura 26.</b> Resumen del intercambio de mensajes entre módulos.....	68
<b>Figura 27.</b> Ejemplo de fichero con los recursos necesarios para realizar la simulación con dimensionado previo. ....	69
<b>Figura 28.</b> Ejemplo de fichero de dimensionado .....	70



## Índice de tablas

---

### Contenido

<b>Tabla 1.</b> Posibles combinaciones para establecer las peticiones requeridas y su relación con el número de <i>slots</i> y saltos utilizados en el escenario heterogéneo.....	37
<b>Tabla 2.</b> Valores de capacidad (Gb/s), coste (u.c) y alcance máximo transparente (km), respecto al formato de modulación [6, 7, 10]. .....	41
<b>Tabla 3.</b> Valores de coste (u.c) por amplificador [6, 7]. .....	41
<b>Tabla 4.</b> Valores de coste (u.c) por WSS [6, 7]. .....	41
<b>Tabla 5.</b> Valores de capacidad (Gb/s) y coste (u.c) respecto el máximo número de puertos por equipamiento IP [6, 9]. .....	42
<b>Tabla 6.</b> Coste de reparación (u.c) por fallo en equipamiento [6, 11]. .....	46
<b>Tabla 7.</b> MTBF(h) optimista, nominal y conservador, por fallo para los distintos equipos de red [6, 11, 12]. .....	47
<b>Tabla 8.</b> Coste de alquiler por metro cuadrado y mes [6, 11]. .....	47
<b>Tabla 9.</b> <i>Slots</i> para los distintos equipos de red. ....	47
<b>Tabla 10.</b> Análisis del número de metros cuadrados por <i>slots</i> , por <i>shelves</i> y por <i>racks</i> . ..	48



## Índice de ecuaciones

---

### Contenido

<b>Ecuación 1.1.</b> Capex total de los transpondedores.....	41
<b>Ecuación 1.2.</b> Capex por equipo transpondedor .....	41
<b>Ecuación 1.3.</b> Capex total de los amplificadores .....	41
<b>Ecuación 1.4.</b> Capex por equipo amplificador .....	41
<b>Ecuación 1.5.</b> Número de WSSs .....	42
<b>Ecuación 1.6.</b> Grado lógico entrante y saliente .....	42
<b>Ecuación 1.7.</b> Capex total de los OXCs .....	42
<b>Ecuación 1.8.</b> Capex por nodo OXC .....	42
<b>Ecuación 1.9.</b> Capex total del equipamiento IP/MPLS .....	43
<b>Ecuación 1.10.</b> Aproximación de los costes por nodos IP/MPLS mediante regresión lineal (primer modelo) .....	43
<b>Ecuación 1.11.</b> Aproximación de los costes por nodos IP/MPLS mediante regresión lineal (segundo modelo).....	43
<b>Ecuación 1.12.</b> Capex total .....	44
<b>Ecuación 2.1.</b> Potencia total de los transpondedores .....	44
<b>Ecuación 2.2.</b> Potencia de los transpondedores por conexión establecida .....	44
<b>Ecuación 2.3.</b> Potencia por subportadora .....	44
<b>Ecuación 2.4.</b> Potencia total de los amplificadores .....	45
<b>Ecuación 2.5.</b> Potencia por equipo amplificador .....	45
<b>Ecuación 2.6.</b> Potencia total de los WSSs .....	45
<b>Ecuación 2.7.</b> Potencia por equipo WSS .....	45
<b>Ecuación 2.8.</b> Potencia total de los nodos IP/MPLS .....	45
<b>Ecuación 2.9.</b> Potencia por nodo IP/MPLS .....	45
<b>Ecuación 2.10.</b> Potencia total .....	46
<b>Ecuación 2.11.</b> Opex por consumo de potencia .....	46

<b>Ecuación 2.12.</b> Opex por reparación de cada equipo .....	46
<b>Ecuación 2.13.</b> Opex por reparación de cada tipo de equipo .....	46
<b>Ecuación 2.14.</b> Opex totales por reparación .....	47
<b>Ecuación 2.15.</b> <i>Slots</i> totales .....	48
<b>Ecuación 2.16.</b> Número de <i>shelves</i> .....	48
<b>Ecuación 2.17.</b> Número de <i>racks</i> .....	48
<b>Ecuación 2.18.</b> Metros cuadrados por <i>rack</i> .....	48
<b>Ecuación 2.19.</b> Opex por nodo de alquiler y mantenimiento .....	48
<b>Ecuación 2.20.</b> Opex total de alquiler y mantenimiento .....	48
<b>Ecuación 2.21.</b> Opex total .....	49
<b>Ecuación 3.1.</b> <i>Slots</i> máximos por nodo por transponedor .....	76
<b>Ecuación 3.2.</b> <i>Slots</i> máximos por nodo por equipo OXC.....	77
<b>Ecuación 3.3.</b> Puertos IP activos máximos por nodo .....	77
<b>Ecuación 3.4.</b> <i>Slots</i> máximos por nodo por equipo IP .....	77
<b>Ecuación 3.5.</b> Opex acumulado .....	77
<b>Ecuación 3.6.</b> Opex ponderado .....	77

---

# Capítulo I

---

## Introducción

---

### 1. Motivación y aportaciones

El crecimiento exponencial de tráfico debido a los servicios multimedia y el aumento de las fuentes de tráfico debido a los modelos cambiantes de contenidos a través de Internet [1] está teniendo un fuerte impacto en el desarrollo de redes de transporte y en particular en las redes de comunicaciones ópticas.

Aunque hasta el momento el modelo más extendido eran las redes WDM (*Wavelength Division Multiplexing* o multiplexación por división de longitud de onda) en las que el espectro se dividía en una rejilla de canales establecida por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-T) [2], recientemente ha aparecido el concepto de redes ópticas elásticas o flexibles [3-5]. Al contrario que en las redes WDM clásicas, en las que el ancho de banda de cada canal es fijo, las redes ópticas elásticas permiten el establecimiento de conexiones ópticas (o *lightpaths*) con diferentes anchuras espectrales [4]. Esta característica lleva a un uso más eficiente de los recursos de la red cuando se compara con las redes tradicionales de rejilla fija, ya que la cantidad de espectro óptico asignado a un *lightpath* puede adaptarse a sus necesidades. Además, el espectro asignado puede expandirse o comprimirse dinámicamente para acomodar variaciones de tráfico. La variación del ancho de banda espectral puede conseguirse variando el número de subportadoras asignadas a cada *lightpath* y puede complementarse con el uso de formatos de modulación diferentes (con eficiencias espectrales distintas), proporcionando de este modo flexibilidad adicional en la operación y prestaciones conseguidas en la red. Sin embargo, esa flexibilidad incrementa la complejidad de los mecanismos de control de la red.

Este Trabajo Fin de Máster (TFM) se centra en el problema de *traffic grooming* dinámico en redes elásticas [3,5], el cual se describe a continuación. Los usuarios pueden solicitar conexiones a tasas binarias que pueden no coincidir con la capacidad de un *lightpath*. Aunque la propiedad de elasticidad proporciona una solución para adaptar la capacidad de un *lightpath* a las demandas de los usuarios, se puede conseguir un uso más eficiente de los recursos si esa propiedad se combina con una técnica denominada *grooming*, la cual consiste en agregar varias conexiones de usuarios en un único *lightpath* y asegurarse que el tráfico llegue al destino a través de una secuencia de uno o más *lightpaths*. En este escenario, suponiendo un sistema de control centralizado, para cada petición de establecimiento de conexión (recibida en tiempo real), el nodo de control tiene que decidir:

- si encaminar esa conexión a través de un *lightpath* ya existente entre el nodo origen y el nodo destino de esa conexión,
- si encaminar esa conexión a través de una secuencia de *lightpaths* ya existentes,
- si establecer un nuevo *lightpath* conectando directamente los nodos origen y destino y encaminando la conexión (es decir, enviando el tráfico) directamente a través de él,

- o si establecer uno o más *lightpaths* entre algunos pares de nodos de la red y encaminar la conexión usando esos nuevos *lightpaths* y quizá otros previamente existentes.

Es importante notar que estas posibilidades implican adaptar el ancho de banda de los *lightpaths* implicados de modo que puedan acomodar esa nueva conexión (es decir, ese nuevo tráfico adicional).

Este TFM tiene su punto de partida en la propuesta de Zhang et al. [3]. En dicho artículo se propone un método y un conjunto de políticas para *traffic grooming* dinámico, es decir, el problema que se acaba de describir, y se analizan sus prestaciones suponiendo que los transceptores utilizan modulación QPSK y un medio físico ideal.

En el Proyecto Fin de Carrera (PFC) de J.J. Castro [1], se desarrolló un simulador en el entorno OMNeT++ [16] implementando los algoritmos de Zhang et al. [3] y se extendió el estudio analizando las prestaciones de la red cuando se usan otros formatos de modulación (16QAM y 64QAM) y cuando se tienen en cuenta los problemas del medio físico. Además, en dicho proyecto también se estudió cómo las políticas de Zhang et al. pueden usarse en la operación de una red heterogénea donde los formatos de modulación QPSK, 16QAM y 64QAM coexisten.

A continuación, en mi Trabajo Fin de Grado (TFG) [19], se implementó un modelo tecno-económico para poder evaluar las distintas alternativas en términos de costes. Para ello se trasladó un modelo desarrollado en el proyecto europeo CHRON [6] a las características del entorno considerado en la propuesta de Zhang et al. [3]. El TFG puso el énfasis en la validación de dicho entorno más que en la obtención de conclusiones concretas (de hecho los análisis preliminares que allí se hicieron fueron únicamente para transceptores homogéneos con modulación QPSK).

Este TFM continúa ese trabajo y realiza las siguientes aportaciones:

- El PFC de J.J. Castro [1] desarrolló dos simuladores independientes: uno para transceptores homogéneos y otro para transceptores heterogéneos. En el TFG [19] se continuó operando de dicha forma. Una primera aportación de este TFM ha sido adaptar el simulador basado en transceptores heterogéneos para que permita también la situación homogénea, validándolo adecuadamente. De esta forma se dispone de un único simulador más genérico y más sencillo de mantener. Esta aportación se describe en el Anexo de este TFM.
- Se ha hecho un estudio de simulación más detallado que el realizado en el PFC [1] con respecto a los estudios de probabilidad de bloqueo de ancho de banda (sobre todo para el caso heterogéneo) y que el presentado en el TFG [19] en lo referido a los costes (incorporando resultados para transceptores homogéneos con modulaciones 16QAM y 64QAM así como para transceptores heterogéneos). De hecho, estos estudios se presentaron en el congreso internacional ICTON 2015 [18] y se incluyen como parte inicial del Capítulo V de esta memoria.
- Los estudios antes mencionados (incluyendo la ponencia en la ICTON 2015 [18]), en línea con el trabajo de Zhang et al., consideraban que el único recurso limitado en la red era el espectro disponible, de modo que si era necesario añadir un transmisor (por ejemplo) con el fin de que no se bloqueara una conexión, ese

transmisor se añadía. Esto tiene dos inconvenientes. Por un lado, no es una situación muy realista, ya que evidentemente en una red no pueden añadirse recursos físicos en tiempo real. Por otro lado, esto lleva a la situación de que, ante una misma carga ofrecida, los costes obtenidos con distintos tipos de transceptores y algoritmos no eran comparables, ya que la red no estaba dimensionada previamente y cada escenario tenía unos niveles de prestaciones diferentes. Así pues, en este TFM:

- Se ha adaptado el simulador para que pueda funcionar en dos modos distintos: sin dimensionado previo o con dimensionado previo. Cuando el simulador se configura para operar sin dimensionado previo, añade componentes a medida que se requieren y, además, como novedad, genera un fichero de dimensionado en el que se indican los recursos necesarios de cada tipo en cada nodo de la red. Cuando el simulador se configura para operar con dimensionado previo, lee un fichero de dimensionado en el que se indican los recursos disponibles en cada nodo de la red, y opera de modo que se bloquean conexiones en caso de no existir componentes disponibles para las mismas por estar ya en uso por otras conexiones. En el Capítulo III de esta memoria se describen brevemente estos métodos de operación y se proporciona más información en el Anexo.
- Se ha desarrollado una metodología para dimensionar la red de manera que se obtienen los recursos y cargas necesarios para obtener una probabilidad de bloqueo de ancho de banda de aproximadamente  $10^{-3}$ , y se ha realizado una comparativa a nivel de costes, para determinar qué combinaciones de tipo de transceptor y algoritmo de *traffic grooming* son las más adecuadas para cada rango de cargas. Esto se describe en el Capítulo V.

El presente documento intenta ser un referente para entender la influencia de las redes ópticas elásticas en la actualidad y la importancia de elegir bien la mejor combinación entre algoritmos y políticas de *grooming* de cara a una mejor eficiencia tanto económica como de rendimiento de tráfico en la red.

## 2. Organización de la memoria

La memoria está organizada de la siguiente manera:

El capítulo II presenta los fundamentos de las redes ópticas elásticas, abarcando sus características y conceptos más importantes, así como el equipamiento y diseño de las capas óptica y eléctrica [5]. Este capítulo es análogo a uno incluido en el TFG [19]. La razón es que el objetivo de este TFM no es incluir un estudio actualizado del estado de la técnica (realmente tampoco lo era en el TFG) sino dar simplemente las nociones básicas sobre este tipo de redes para que pueda entenderse el resto de la memoria sin tener que recurrir a otras fuentes.

El capítulo III realiza una primera aproximación a la red y al simulador utilizado para el caso de estudio, abarcando la topología de la red a analizar y los algoritmos implementados en dicho simulador (es decir, las políticas de *traffic grooming*) [1, 3]. Como novedades frente al TFG se incluye una descripción más clara del

funcionamiento de los algoritmos, acompañada de un ejemplo concreto, y una breve descripción los nuevos modos de operación del simulador (sin y con dimensionado previo) de los que antes carecía.

El capítulo IV analiza el estudio de los costes en la red óptica elástica. Dichos costes abarcan desde los costes de capex, referentes a los costes de adquisición y primera instalación del equipamiento, y los costes de opex, referentes al coste por uso de la red. El modelo es el mismo que se usó en el TFG con algunas actualizaciones que se describe al comienzo y a lo largo de dicho capítulo.

El capítulo V es el núcleo del TFM y la principal aportación del mismo. En él se analizan los resultados obtenidos mediante simulación, realizando la comparativa entre los costes obtenidos, de manera que se determine qué opción es más económica, si el uso de transceptores homogéneos, heterogéneos, y el algoritmo más adecuado. Para ello, se realiza una fase previa de dimensionamiento de la red para asegurar que todas las opciones dan lugar a una tasa de bloqueo de ancho de banda aproximadamente equivalente.

El Capítulo VI muestra las conclusiones del Trabajo Fin de Máster, así como futuras líneas de investigación.

Finalmente, el Anexo presenta la implementación de los dos modos de operación del simulador (sin dimensionado y con dimensionado previo), así como la parte tecnológica del simulador desarrollado con OMNeT++.



## Capítulo II

# Fundamentos de Redes Ópticas Elásticas

---

### 1. Definición de redes ópticas elásticas

Tal y como se ha comentado en la introducción, el objetivo de este capítulo no es presentar un estudio del estado de la técnica de las redes óptica elásticas, sino simplemente proporcionar una serie de conceptos básicos asociados a las mismas que facilite la lectura del resto de la memoria.

Las redes ópticas elásticas son el resultado de un creciente incremento de tráfico que ha dado lugar a nuevas investigaciones en las redes ópticas llegando a la conclusión de que es necesario un nuevo ajuste de las redes actuales para permitir satisfacer las necesidades de los clientes.

Las redes ópticas elásticas, cuyo concepto se presenta en [5], tienen como características principales:

➤ **Capacidad de la red para ajustar dinámicamente el ancho de banda.**

Hasta el momento WDM permitía la división del espectro en ranuras que tenían que ser del mismo tamaño. De esta manera se produce un uso ineficiente del espectro ya que en muchas ocasiones el ancho de banda ocupado por una conexión eléctrica transmitida por una conexión óptica o *lightpath* es mucho menor que su capacidad, por lo cual habrá un espacio restante que no es utilizado de manera que se desaprovecha parte del espectro.

Con las redes ópticas elásticas se permite división del espectro de manera flexible, pudiéndose adecuar el tamaño del espectro para cada demanda en función de su tasa binaria y la distancia de transmisión.

Para conseguir este objetivo se ha investigado el uso de distintos formatos de modulación y tecnologías.

- Respecto a los formatos de modulación, los recientes avances han conseguido que se permitan tasas de bits sintonizables. Destacan las investigaciones en la multiplexación por división de frecuencia ortogonal óptica coherente (OFDM), Nyquist WDM (N-WDM), y la generación de forma de onda arbitraria óptica (OAWG).

De los formatos de modulación multiportadora que se han investigado, este estudio se centra en OFDM. OFDM permite transmitir canales de gran capacidad en subportadoras ortogonales de menor tasa binaria. Dichas subportadoras tienen una separación igual a múltiplos de la inversa del periodo de símbolo (aunque se solapan en el dominio de la frecuencia no interfieren entre sí), se pueden modular y la señal formada puede transportarse a través de fibras ópticas.

El ajuste del ancho de banda (y de la tasa binaria total) se puede realizar mediante el ajuste del número de subportadoras.

- Entre las tecnologías que se están investigando, la tecnología *flexgrid*, que es la que se utiliza en este estudio, es una buena alternativa. Dicha tecnología permite dividir el espectro óptico en *slots* de la misma anchura. La diferencia entre *flexgrid* y WDM (rígido) se puede ver en la Figura 1.

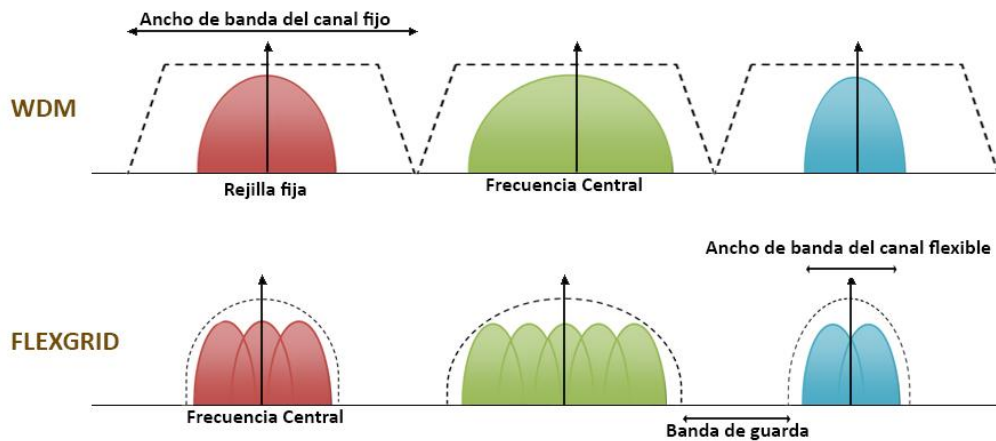


Figura 1. Diferencia entre la asignación de espectro mediante WDM y FLEXGRID. En la tecnología WDM el ancho de banda es fijo, mientras que en la tecnología FLEXGRID se utilizan subportadoras de tamaño fijo que se solapan de manera que el ancho de banda total es variable.

- **Uso de transpondedores flexibles que puedan permitir tasas de bit variables.**
- **Uso de distintos formatos de modulación de acuerdo con los requisitos de cada conexión.**

Este aspecto es realmente interesante debido a que existe un compromiso entre la cantidad de espectro ocupado por cada modulación y la distancia que puede alcanzar dicha modulación.

De esta manera lo que se hace es elegir el formato de modulación que más se adecue a las características deseadas, evitando el desperdicio de ancho de banda que se consigue al imponer el tipo de modulación.

## 2. Equipamiento de la capa IP

A nivel de equipamiento en la capa IP cabe destacar dos tipos de equipos importantes, por un lado los nodos IP/MPLS y por otro los transpondedores, lo cual se puede profundizar en [5].

### Nodos IP/MPLS

Respecto a los nodos IP/MPLS su función es realizar la agregación de tráfico de las peticiones por medio de dicha tecnología. Se hacen necesarios en la capa eléctrica por la necesidad de preparación de las capas superiores de una manera rentable para proporcionar un ancho de banda bajo demanda automatizando los procesos.

### **Transpondedores**

En relación a los transpondedores, para su uso en redes ópticas elásticas, no se pueden usar los utilizados hasta el momento sino que deben tener una serie de características concretas. Las características más importantes que ofrecen este tipo de equipos son los diferentes grados de flexibilidad con respecto al formato de modulación, la tasa de símbolos, la relación de la FEC (*Forward Error Correction* o corrección de errores hacia adelante) sobre la carga útil, el número y espaciamiento de las subportadoras que componen un supercanal, así como la separación entre canales. Para entender mejor el compromiso entre estos conceptos se puede ver [5].

Para permitir el uso de los transpondedores flexibles se ha hecho necesario cambiar la estandarización del rango de frecuencias de la ITU-T [1], para que se permita una configuración flexible.

## **3. Equipamiento de la capa óptica**

La capa óptica está compuesta por nodos ópticos (OXC), enlaces que incorporan la tecnología *flexgrid* y amplificadores [5].

### **Nodos OXCs**

Los conmutadores ópticos elásticos deben ser capaces de realizar la conmutación de supercanales con características de ancho de banda variable.

Estos equipos están compuestos por diferentes elementos, destacando entre ellos los WSS (*Wavelength Selective Switches* o conmutadores selectivos en longitud de onda), que se encargan de seleccionar la longitud de onda dentro del OXC.

Como una señal atraviesa múltiples nodos OXCs, es de gran importancia la forma en la que está implementado el filtro de los WSS ya que de ello dependerá la calidad de la señal.

### **Amplificadores**

Evidentemente la función de dichos equipos es permitir aumentar la longitud de las conexiones que se envían a través de los enlaces que conectan unos nodos con otros compensando la atenuación existente en dichos enlaces.

En el trabajo se van a usar equipos amplificadores bidireccionales, para lo cual cada uno de ellos está formado por dos EDFAs, uno para cada sentido.

## **4. Diseño de redes ópticas elásticas**

En la topología de las redes ópticas elásticas los nodos IP/MPLS están conectados con los OXCs subyacentes por medio de puertos optoelectrónicos. En este caso de estudio cada nodo IP/MPLS está localizado junto a un OXC. Situándose el primero en la capa eléctrica y el segundo en la capa óptica.

En el caso que se aborda, los nodos IP/MPLS realizan su función cuando comienza y acaba un *lightpath*, es decir, son los nodos de origen y destino de dichos *lightpaths*,

mientras que los nodos OXCs son los nodos intermedios por los que pasa el *lightpath*. Un ejemplo se puede ver en la Figura 2.

Cada *lightpath* a su vez puede multiplexar múltiples conexiones eléctricas, las cuales tienen origen en un nodo IP/MPLS, destino en otro nodo IP/MPLS y pueden ser encaminadas a lo largo de más de un *lightpath*, por lo que pueden pasar por nodos IP/MPLS intermedios (en los que se produce la transición de un *lightpath* a otro).

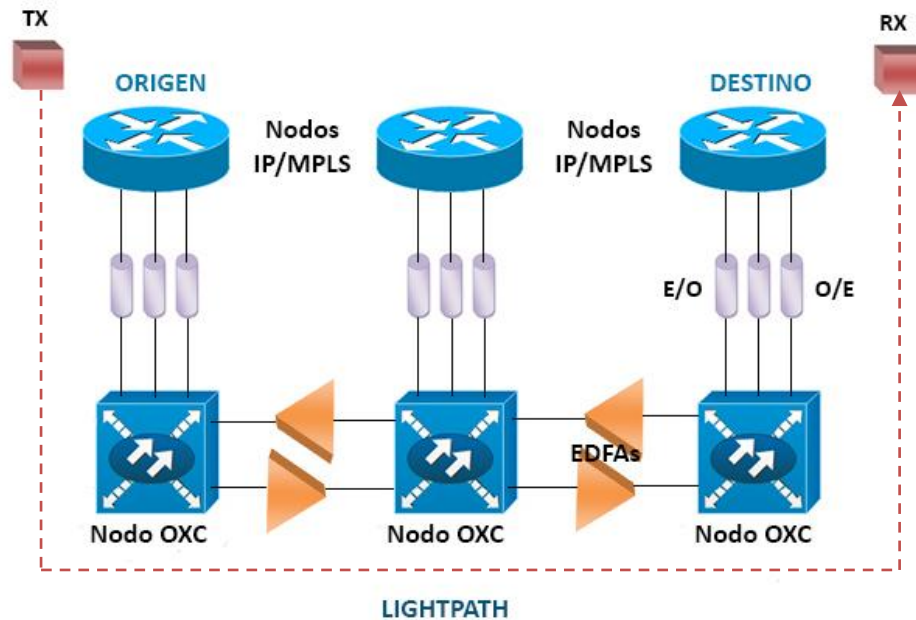


Figura 2. Establecimiento de un *lightpath* entre el nodo origen y destino.

## 5. Análisis de capex y opex

Las diferentes maneras de implementación incurren en diferentes modelos de costes y consumo de energía.

Aunque entre los criterios de selección para los diferentes modelos de implementación se encuentra el ahorro de energía, en la realidad un aspecto muy importante es el ahorro de coste en términos de capex y opex [5, 6].

Para entender este concepto y las secciones que se verán a continuación se van a definir dichos términos:

- El capex se refiere a los gastos de capital para adquirir productos activos con el fin de aumentar la capacidad o eficiencia, en este caso, de una red.
- El opex se refiere al gasto continuo para el funcionamiento de un sistema

Aunque la tecnología flexible puede costar mucho más que la tecnología WDM convencional, la simplificación de la capa IP/MPLS, así como la mayor utilización de la capacidad instalada de fibra, motiva al despliegue de las redes ópticas flexibles.

El siguiente capítulo analizará en detalle el caso de estudio sobre el que posteriormente (en el capítulo IV) se analizará el modelo tecno-económico de las redes elásticas.

## Capítulo III

### Contexto del estudio realizado

Para entender las siguientes secciones lo que se va a presentar es el caso de estudio que se abordará en los siguientes capítulos.

#### 1. Topología de la red de simulación

Para empezar lo primero que se va a ver es la topología física de la red, concretamente la que se ha decidido utilizar es la NSFNet (Figura 3). En esta red como se puede comprobar los nodos se conectan de manera bidireccional, es decir las conexiones pueden ir en ambos sentidos por un mismo enlace. Es por ello que lo que se ve son enlaces, formados cada uno por dos fibras que proporcionan dicha bidireccionalidad. Adicionalmente, se ha decidido que haya tres amplificadores por cada enlace y, por simplicidad, considerar que todos los enlaces tienen la misma longitud.

En la Figura 3 se puede ver la red con la que se han realizado las distintas simulaciones, cuyos resultados se podrán ver en el Capítulo V. Dicha red está formada por catorce nodos, cada uno de los cuales está formado por un *edge-router* que representa la capa eléctrica (nodo IP/MPLS) y un *core-router*, que representa la parte óptica (nodo OXC).

A parte de los catorce nodos la red, cuenta con un nodo de control centralizado que se encarga de toda la gestión y control de la red.

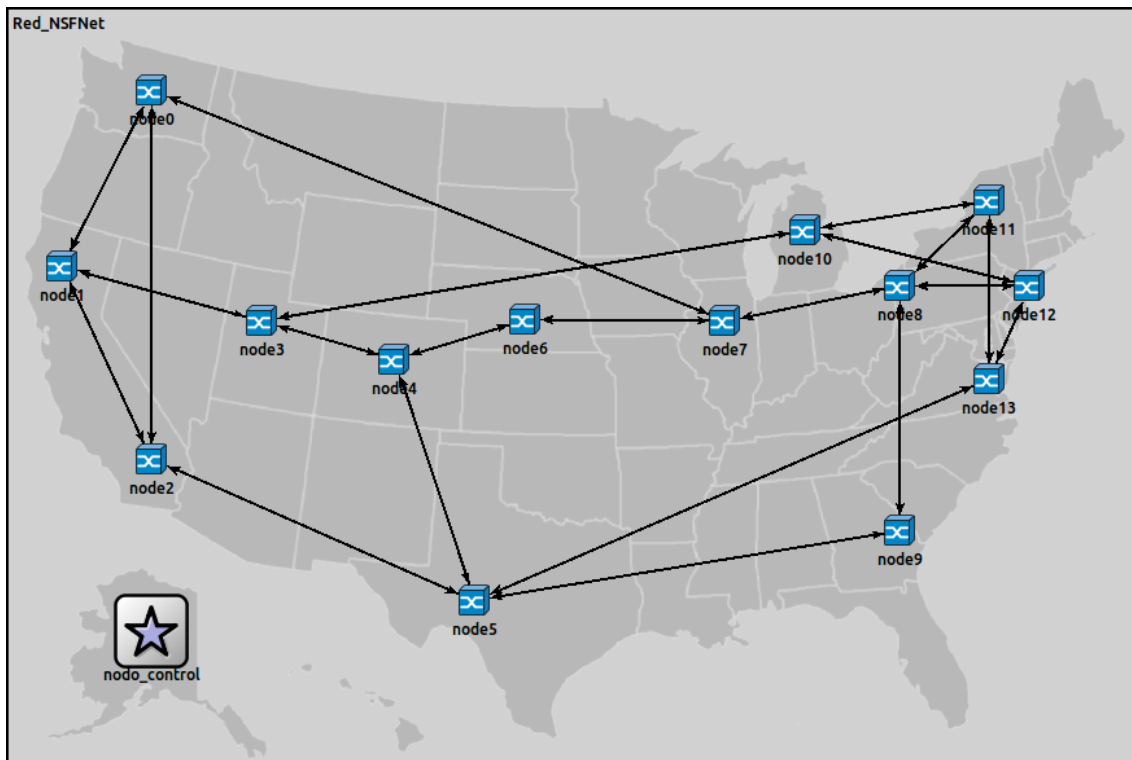


Figura 3. Red de simulación para el estudio del capex y opex.

Respecto a los enlaces planteados en la red de simulación, tienen una capacidad máxima de 1000 GHz, que se divide en *slots* de 5 GHz, de manera que el número total de *slots* por fibra es de 200. Estas suposiciones coinciden con las realizadas en [3].

## 2. Algoritmo de *traffic grooming*

A la hora de responder a una petición de establecimiento de conexión eléctrica aplicando *traffic grooming*, el nodo de control deberá encaminar la conexión por la capa eléctrica y/o por la capa óptica. El nodo de control también deberá liberar las conexiones establecidas cuando así se requiera.

A nivel de capa eléctrica se determinará cómo encaminar la nueva conexión a través de una combinación de *lightpaths* nuevos y/o ya establecidos en la red. Por otro lado, a nivel de capa óptica se decide cómo establecer los nuevos *lightpaths* cumpliendo las restricciones de continuidad de espectro.

### Continuidad del espectro

A la hora de establecer una conexión lo que se debe hacer es en primer lugar encontrar la ruta de menor coste (donde el coste depende del algoritmo elegido) y ver si cumple una serie de restricciones.

Las restricciones se basan en los *slots* por los que pasa la conexión, teniendo en cuenta que entre conexiones ópticas adyacentes se deben respetar dos *slots* de guarda para minimizar interferencias entre las mismas. Por otro lado, con respecto a cada conexión óptica individual (*lightpath*), su espectro debe ser continuo en todas las fibras que atraviesa, es decir, ocupar los mismos *slots* en cada fibra que atraviesa. En cualquier caso es importante aclarar que una conexión eléctrica que atraviesa varios *lightpaths* puede ocupar *slots* distintos en cada uno de esos *lightpaths*.

### Grafo auxiliar y políticas para resolver el problema de *traffic grooming*

El método propuesto por Zhang et al. [2] para resolver el problema de *traffic grooming* dinámico en redes elásticas consiste en construir un grafo auxiliar cada vez que se recibe una petición de conexión y a continuación encontrar en él el camino de menor coste.

Se supone una red óptica elástica en la que el espectro está dividido en  $T$  *slots*. Cuando se recibe una petición solicitando  $b$  *slots* espectrales, se construye un grafo auxiliar multicapa representando al estado actual de la red. Los nodos en cada capa del grafo se corresponden con los nodos de la topología física de la red. La primera capa del grafo se denomina la *capa eléctrica*. Dos nodos están conectados en dicha capa si ya existe un *lightpath* conectando esos dos nodos y si ese *lightpath* podría usarse para acomodar la petición solicitada “engordando” con más subportadoras. Las otras capas del grafo se denominan *capas de espectro*. Las capas de espectro representan los recursos espectrales en las redes ópticas que podrían usarse para establecer nuevos *lightpaths* para acomodar la petición solicitada. Suponiendo que el espectro asignado a un *lightpath* debe dejar espacio para  $B$  *slots* de guarda adyacentes a cada lado, un nuevo *lightpath* realmente requiere  $(B+b+B)$  *slots* no usados consecutivos. Entonces, dos nodos en la capa de espectro  $i$  se conectan por un enlace si hay una fibra conectando

esos dos nodos y si hay  $(b+2B)$  slots no usados consecutivos comenzando desde el slot  $i$  en esa fibra. Por lo tanto, hay  $T-(b+2B)+1$  capas de ese tipo. Finalmente, se añaden enlaces conectando los nodos en la capa eléctrica con sus nodos correspondientes en las capas de espectro. Después, se fijan los pesos del grafo de acuerdo a una cierta política y se busca la ruta de menor coste, la cual proporciona una solución al problema de *traffic grooming* dinámico. Cuando la ruta de menor coste en el grafo auxiliar atraviesa un enlace de la capa eléctrica, eso significa que la conexión se encaminará a través de un *lightpath* existente. Cuando la ruta implica ir desde la capa eléctrica a una de las capas de espectro, eso significa que el nuevo *lightpath* será establecido usando los recursos espectrales asociados con esa capa.

A continuación se va a ver un caso demostrativo para entender cómo funciona el algoritmo en una red de ejemplo. Por simplificar, se supondrá que no es necesario dejar bandas de guarda entre *lightpaths* adyacentes. La Figura 4 muestra la topología de la red, la cual consta de tres nodos conectados en línea y en la que ya ha sido establecido un *lightpath* entre los nodos A y B utilizando un solo slot de los  $T$  disponibles.

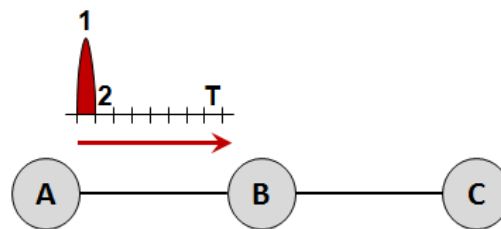


Figura 4. Estado de la red.

1. Lo primero que sucede es que llega una petición que se quiere establecer. Las características de la petición es que su tamaño es de  $b = 1$  slot y sus nodos origen y destino son A y C. Por lo tanto, se construye el grafo auxiliar, el cual consta de una capa eléctrica y  $T-(b+2B)+1 = T-(1+0)+1 = T$  capas. Los nodos  $A_0$  y  $B_0$  (capa eléctrica) están conectados por un enlace debido a que existe un *lightpath* entre los nodos A y B. Por el contrario, los nodos  $A_1$  y  $B_1$  no están conectados al estar el slot 1 ocupado entre los nodos A y B.

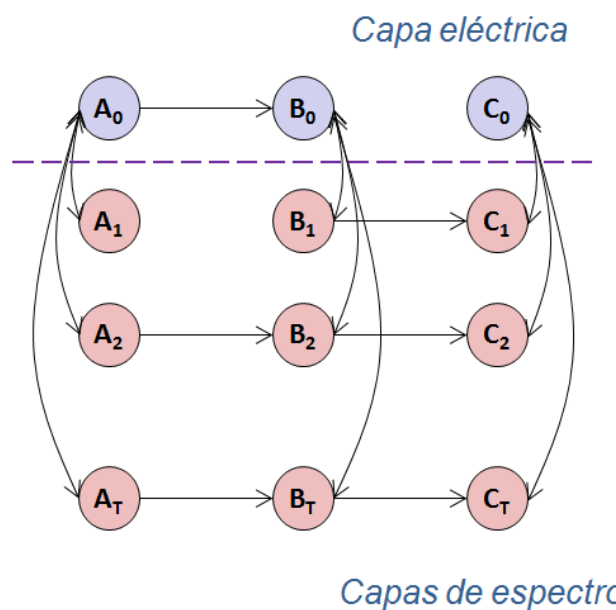


Figura 5. Grafo auxiliar de la red en el cual se puede ver la estructura de la capa eléctrica y espectral.

A continuación se asignan pesos a los distintos enlaces del grafo y se busca la ruta de menor coste.

- 1.1. Se supone que una cierta política da un peso muy elevado a los enlaces de la capa eléctrica. En esta situación lo que sucederá es que el algoritmo encontrará alternativas para establecer un nuevo *lightpath* entre A y C, evitando establecer conexiones en la capa eléctrica, tal y como se puede ver en las siguientes figuras. En este caso concreto la ruta en el grafo auxiliar circula a lo largo de la capa de espectro número 2, lo cual quiere decir que se establecerá un nuevo *lightpath* directo entre A y C utilizando el *slot* número 2.

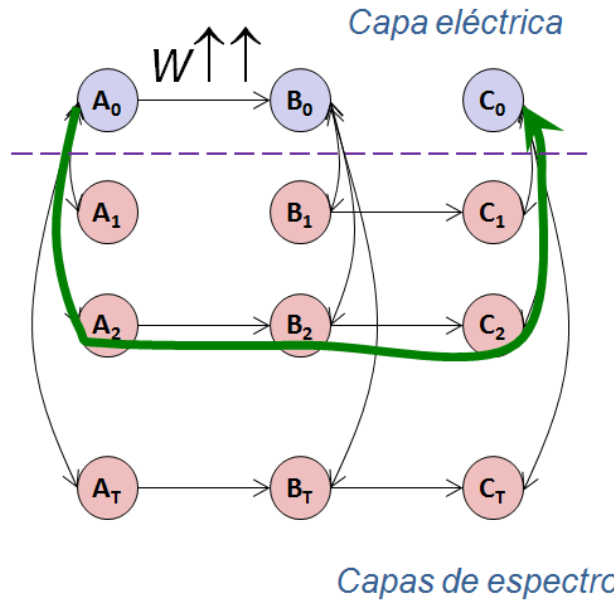


Figura 6. Grafo auxiliar con el establecimiento de un nuevo *lightpath* entre A y C.

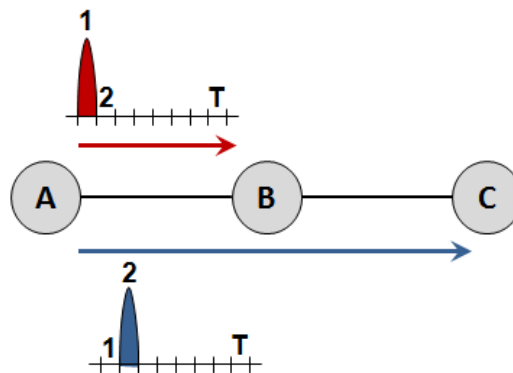


Figura 7. Establecimiento de una nueva conexión entre A y C mediante el establecimiento de un nuevo *lightpath*.

- 1.2. Se supone ahora una política distinta de la anterior que asigna un peso muy pequeño a la capa eléctrica. En esta situación lo que sucederá es que el algoritmo buscará rutas en el grafo auxiliar que atraviesen prioritariamente enlaces de la capa eléctrica (es decir, que utilicen *lightpaths* ya existentes), tal y como se puede ver en las siguientes figuras. En este caso, la ruta encontrada en el grafo auxiliar viaja por la capa eléctrica entre los nodos A y B, lo cual quiere decir que se utilizará el *lightpath* ya existente entre A y B “engordando



su espectro”, y a continuación se baja a la primera capa de espectro, lo cual quiere decir que entre los nodos B y C se establecerá un nuevo *lightpath* usando el *slot* 1 y que terminará de llevar el tráfico hasta el destino.

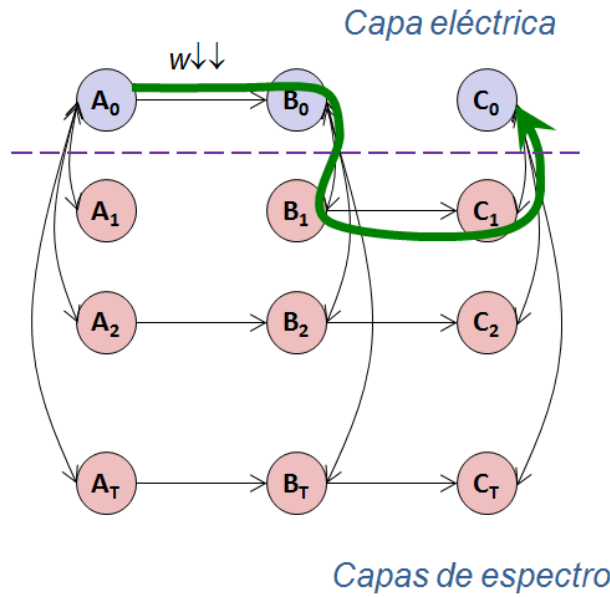


Figura 8. Grafo auxiliar con el uso de un *lightpath* ya establecido entre A y B y el establecimiento de un nuevo *lightpath* entre B y C.

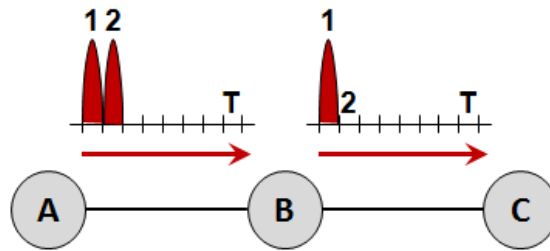


Figura 9. Establecimiento de una nueva conexión entre A y C mediante el uso de un *lightpath* ya establecido y el establecimiento de un nuevo *lightpath*.

A nivel del presente estudio lo que se hace a la hora de aplicar las distintas políticas de *grooming*, es emplear una serie de pesos que da lugar a las distintas decisiones que se toman a la hora de establecer una nueva conexión. Es por ello que mediante este sencillo ejemplo el lector se puede hacer una idea de cómo se toman las decisiones a nivel de simulación.

### Políticas de traffic grooming

Las diferentes políticas de *grooming* [1, 3] utilizadas determinan, por tanto, cómo establecer las peticiones de conexiones, dando prioridad a unos u otros aspectos.

Cada política determina qué coste asignar a cada arco del grafo auxiliar, lo cual hará que el algoritmo de Dijkstra devuelva en general distintas rutas cuando se emplea cada una de esas políticas.

Las políticas que se pueden plantear en la simulación son:

- ***Minimum Number of Lightpaths (MinLPs):***

El fundamento principal es utilizar al máximo los *lightpaths* ya establecidos. De esta manera, los enlaces entre capas deben tener un peso mucho mayor que los enlaces de la capa eléctrica y estos mucho más peso que los enlaces de las capas de espectro.

- ***Minimum Number of Virtual Hops (MinHops):***

El fundamento principal es minimizar el número total de *lightpaths* por los que atraviesa la nueva petición cursada. En este caso, el peso de un enlace entre capas es ligeramente inferior que la mitad de un enlace de la capa eléctrica y ambos deben ser mucho mayores que el peso de un enlace de la capa de espectro, que debe ser el menor.

- ***Minimum Number of Traffic Hops in the Physical Network (MinTHP):***

El fundamento principal es minimizar el número total de fibras ópticas que atraviesa la nueva conexión. Para ello, el peso de un enlace de la capa eléctrica debe ser el peso de un enlace de la capa de espectro multiplicado por el número de saltos físicos o fibras que atraviese el *lightpath* al que representa en la red física. Mientras que el peso de un enlace entre capas tiene que ser mucho menor que el de los otros dos tipos de arcos.

- ***Load-Balancing (LB):***

El fundamento principal es minimizar la probabilidad de bloqueo de ancho de banda. Para implementar esta política, la nueva conexión debería ser encaminada a través de las fibras con cargas más ligeras. Para conseguir dicho propósito, el peso de los enlaces de la capa eléctrica y de los de la capa de espectro debe ser proporcional al ancho de banda utilizado en sus correspondientes fibras, y el peso de un enlace entre capas tiene que ser mucho menor que estos.

### **Esquema de reserva de espectro (SR, *Spectrum Reservation Scheme*)**

Las políticas de *traffic grooming* antes mencionadas pueden combinarse con un esquema de reserva de espectro [1, 3]. Dicho esquema permite utilizar de manera eficiente el ancho de banda de los *lightpaths*, el cual es desperdiciado por la elevada capacidad de los transpondedores OFDM.

El fundamento principal de este esquema es la reserva de ancho de banda en aquellos *lightpaths* no utilizados completamente, para lo cual se definen tres estados para los *slots*: ‘utilizado’, ‘libre’ y ‘reservado’.

Sin el esquema de reserva si posteriormente al establecimiento del *lightpath* se pretende establecer nuevas solicitudes no es posible en muchas ocasiones ya que no siempre se puede aumentar el ancho de banda del *lightpath* si hay conexiones ópticas adyacentes en el espectro.

A la hora de implementar dicho esquema hay que tener en cuenta en que momentos tiene interés:

- Cuando se establece un *lightpath* y no utiliza al máximo la capacidad del transpondedor.
- Cuando una conexión se acomoda en un *lightpath* ya existente.
- Cuando se libera una conexión eléctrica e interesa que los *slots* que queden vacíos sean establecidos como reservados, siempre y cuando el *lightpath* no quede vacío.

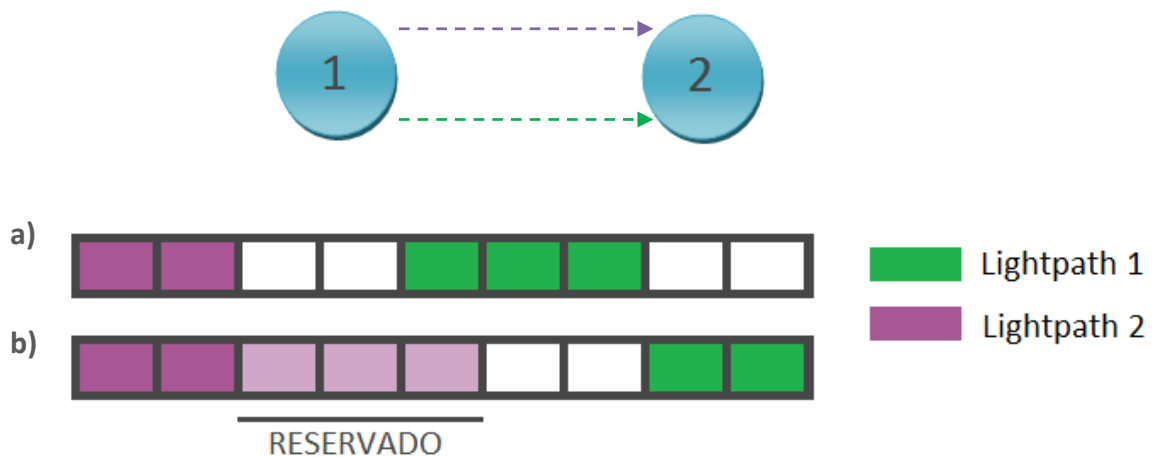


Figura 10. Diferencias entre *lightpaths* establecidos sin reservar espectro (a) y con reserva de espectro (b).

Hay que tener en cuenta que un transpondedor OFDM tiene la capacidad de compactar el tráfico dentro de su rango de frecuencias para usar siempre las subportadoras a menor frecuencia. Este aspecto es especialmente útil cuando una conexión se libera ya que se volverán a compactar los *slots* (o *mini-grids*) que utiliza el *lightpath*.

### 3. Escenarios de simulación

El formato de modulación para cada subportadora puede variar para ajustar las tasas de datos o adaptarse a diferentes distancias de transmisión. En este estudio se suponen tres tipos de modulación: QPSK, 16QAM, 64QAM, cuya capacidad es:

- 10 Gb/s por *slot* QPSK.
- 20 Gb/s por *slot* 16QAM.
- 30 Gb/s por *slot* 64QAM.

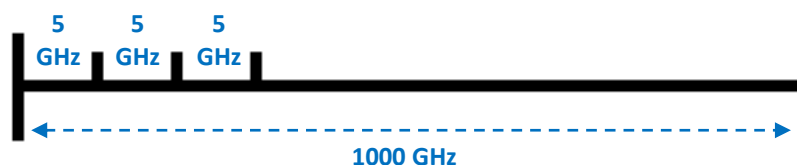


Figura 11. Capacidad máxima de un *lightpath* y de los *slots* que contiene.

La fuente generará peticiones de conexión de tres tipos, por analogía con [3]:

- Con ancho de banda de 10 Gbps y una frecuencia de 10 de cada 15.
- Con ancho de banda de 20 Gbps y una frecuencia de 4 de cada 15.
- Con ancho de banda de 30 Gbps y una frecuencia de 1 de cada 15.

Con los datos anteriores, es de interés en este estudio tecno-económico realizar el análisis en dos escenarios:

- **Escenario homogéneo (cada transpondedor sólo puede generar un único formato de modulación):** En este caso durante toda la simulación solo se usará un formato de modulación a elegir entre QPSK, 16QAM y 64QAM. Por tanto, las peticiones pueden variar entre un tamaño de 10, 40 y 100 Gb/s usando solo subportadoras de un mismo tipo.

La forma de cursar estas peticiones se puede resumir de la siguiente manera:

- **Peticiones de 10 Gb/s:**
  - Se necesitará 1 *slot* para modulaciones QPSK.
  - Se necesitará 1 *slot* para modulaciones 16QAM.
  - Se necesitará 1 *slot* para modulaciones 64QAM.
- **Peticiones de 40 Gb/s:**
  - Se necesitarán 4 *slots* para modulaciones QPSK.
  - Se necesitarán 2 *slots* para modulaciones 16QAM.
  - Se necesitarán 2 *slots* para modulaciones 64QAM.
- **Peticiones de 100 Gb/s:**
  - Se necesitarán 10 *slots* para modulaciones QPSK.
  - Se necesitarán 5 *slots* para modulaciones 16QAM.
  - Se necesitarán 4 *slots* para modulaciones 64QAM.
- **Escenario heterogéneo (los transpondedores son capaces de generar subportadoras con distintos formatos de modulación):** Como se ha comentado en capítulos anteriores, se asume que un transpondedor puede utilizar una combinación de subportadoras con diferentes formatos de modulación con el fin de servir una petición de conexión. Es por ello que en este escenario durante la simulación se irá intercalando el uso de diferentes formatos (QPSK, 16QAM y 64QAM), de manera que se entenderá mejor el concepto de transpondedor flexible comentado anteriormente.

En este caso la forma de cursar las peticiones puede variar de la siguiente manera:

- **Peticiones de 10 Gb/s:**
  - Se necesitará 1 *slot* con modulación QPSK.
- **Peticiones de 40 Gb/s:**
  - Se necesitarán 4 *slots* con modulación QPSK.

- O bien se necesitarán 2 *slots* si el transpondedor se configura para operar con modulación 16QAM.
- **Peticiones de 100 Gb/s:**
  - Se necesitarán 10 *slots* con modulación QPSK.
  - O bien se necesitarán 5 *slots* si el transpondedor se configura para operar con modulación 16QAM.
  - O bien se necesitarán 3 *slots* con modulación 64QAM y 1 *slot* con modulación QPSK.

En los escenarios planteados es de vital importancia el uso de equipamiento flexible, es decir, que permitan redes ópticas elásticas. En este contexto, conviene destacar el uso de transpondedores de ancho de banda variable que soporten la sintonización de la frecuencia central y la asignación del espectro elástico. Los transpondedores se supondrán con la máxima capacidad, es decir, 10 *slots*. Por tanto el número máximo de *slots* por *lightpath* será de 10.

Es importante tener en cuenta las restricciones que supone el uso de los transpondedores elásticos en combinación con los distintos formatos de modulación, ya que existe un compromiso entre la capacidad de tráfico que permite transmitir por subportadora y la distancia máxima que puede alcanzar. Todos los enlaces de la red se han supuesto de la misma longitud y se han normalizado al alcance óptico del formato de modulación 64 QAM (es decir, el alcance óptico de 64QAM es un salto). El alcance óptico de los formatos de modulación 16QAM y QPSK son 4 y 16 saltos, respectivamente.

Petición	Subportadoras			Slots requeridos (por enlace)	Alcance óptico
	64QAM (30 Gb/s/slot)	16QAM (20 Gb/s/slot)	QPSK (10 Gb/s/slot)		
100 Gb/s	3	-	1	4	1 salto
	-	5	-	5	4 saltos
	-	-	10	10	16 saltos
40 Gb/s	-	2	-	2	4 saltos
	-	-	4	4	16 saltos
10 Gb/s	-	-	1	1	16 saltos

Tabla 1. Posibles combinaciones para establecer las peticiones requeridas y su relación con el número de *slots* y saltos utilizados en el escenario heterogéneo.

#### 4. Modos de operación de simulación

Dado que en el presente estudio lo que se busca es analizar el opex y el capex para un mismo valor de tasa de bloqueo de ancho de banda (BBR, *Bandwidth Blocking Ratio*), se hace necesaria la implantación de mejoras en el simulador utilizado en proyectos previos [1, 18, 19].

Concretamente se han programado dos modos de operación (cuya implementación se puede ver con más detenimiento en el Anexo):

- **Sin dimensionado:** En este caso no se producirá bloqueo por falta de equipamiento, sino que se van añadiendo componentes a medida que se

necesitan y da lugar a un fichero de dimensionado en el que se indican el número de componentes de cada tipo requeridos en cada nodo de la red.

- **Con dimensionado:** En este modo de operación es necesario indicar un fichero de dimensionado en el que se indican el número de componentes disponibles en cada nodo de la red. En este caso se producirá el rechazo de aquellas peticiones que no dispongan de los recursos necesarios para establecerse (por ya estar asignados a otras conexiones).

Hay que tener en cuenta que en ambas modalidades de operación se podrá producir bloqueo tanto por falta de recursos espectrales o por problemas del medio físico.

---

## Capítulo IV

---

# Modelo de costes tecno-económicos en redes elásticas

---

Como ya se ha mencionado, este estudio tiene como punto de partida el estudio tecno-económico realizado en mi TFG [19]. En este capítulo se describe dicho modelo, pero es importante destacar que se han realizado una serie de modificaciones en el mismo. Concretamente, las modificaciones y factores más relevantes son los siguientes:

- Al igual que en [19], los costes se representarán normalizados, definiendo una unidad de coste (u.c.) como el coste de un transpondedor fijo de 10 Gb/s.
- Se ha modificado la capacidad de un *slot*, que previamente (es decir, en [19]) tenía un valor de 12.5 GHz, de manera que ahora cada *slot* es de 5 GHz. Con esto se ha conseguido adaptar más el estudio al modelo presentado por Zhang et al. [3], pues es esa la suposición allí usada. Esta modificación ha llevado a cambios en el coste de diverso equipamiento con respecto a [19].
- Los transpondedores han sido implementados con una parte transmisora y otra receptora, de esta manera se consigue adaptar el estudio haciendo que un *lightpath* necesite utilizar ambas partes al ser establecido. Este cambio ha añadido grandes aportaciones al trabajo, que pasan desde la facilidad en el dimensionado de la red, hasta una mejora en la implementación de ecuaciones como la ec. 1.6, que tras los cambios tiene un mayor sentido.
- A la hora de calcular el coste por consumo de potencia del opex solo se ha tenido en cuenta aquellos dispositivos por los que se transmite tráfico, es decir, los dispositivos que se pueden considerar como activos. En este trabajo aquellos dispositivos que no son usados se les considera que no consumen potencia. En este punto cabe destacar la diferencia respecto al estudio previo [19], ya que en el presente trabajo se tendrá en cuenta en los dispositivos OXC, que aunque no pasen *lightpaths* a través de ellos, sí que consumirán cierta potencia.

En el caso de los costes por reparación se realizarán los cálculos a partir de los recursos considerados como activos, mientras que a la hora de calcular el mantenimiento se tendrán en cuenta todos los dispositivos, ya que el mantenimiento afecta a todos los equipos, estén encendidos o apagados.

A continuación se presenta el estudio dividido en capex y opex y adaptado a las condiciones antes mencionadas. Mientras que el capex abarca los gastos por equipamiento, el opex se refiere al mantenimiento, alquiler y reparación, es por ello que la diferencia a destacar entre ambos radica en que el opex es un gasto dinámico ya que no se mantiene constante en el tiempo (se expresará en unidades de coste por hora), mientras que el capex (se expresará directamente en unidades de coste) es un gasto que se produce al implantar la red y al realizar actualizaciones de su infraestructura.

### 1. Costes de Capital (capex)

Los recursos considerados para el modelo de costes de capex son: transpondedores, amplificadores, *optical cross-connects* (OXCs) y el equipamiento IP.

## Capex por equipamiento

### Transpondedor

Para calcular el capex lo primero que hay que saber es que se ha tenido en cuenta que cada *lightpath* estará asociado a un transpondedor, el cual puede llevar varias conexiones eléctricas multiplexadas.

Los *lightpaths* que se establecen son unidireccionales, de modo que emplea un transmisor en el nodo origen y un receptor en el nodo destino. Así pues, si se establece un *lightpath* de A a B y otro de B a A se usa un transmisor y un receptor en cada nodo, esto es, la parte transmisora y receptora de un transpondedor en el nodo A, y de igual forma en el nodo B. Por tanto, si solo hubiera un *lightpath* entre A y B, solo se usaría la parte transmisora del transceptor situado en A y la receptora del transpondedor situado en B. Por este motivo se dice que por cada *lightpath* se utiliza un transpondedor. En cualquier caso, a la hora de dimensionar los nodos de la red, cada nodo estará equipado con un número de transpondedores igual al máximo entre el número de transmisores y el número de receptores utilizados en él a lo largo del proceso de dimensionamiento.

Una vez entendido este concepto, lo siguiente que se tiene que tener en cuenta es el tipo de transpondedores que se van a utilizar, ya que en función de ello se pueden obtener distintos valores de capacidad y alcance máximo. Haciendo las mismas suposiciones que en [3], cada transpondedor es capaz de transmitir usando un ancho de banda máximo de 50 GHz (10 *slots*). Considerando *slots* de 5 GHz, las modulaciones QPSK, 16QAM y 64QAM dan lugar tasas binarias de 10, 20 y 30 Gb/s/slot respectivamente. Eso quiere decir que un transceptor homogéneo QPSK puede transmitir a una tasa máxima de 100 Gb/s, un transceptor 16QAM puede transmitir a 200 Gb/s y un transceptor 64QAM a 300 Gb/s. En línea con [7] se ha supuesto que el coste de un transceptor elástico capaz de generar una tasa máxima de 100 Gb/s tiene un coste un 20% superior que el de un transceptor coherente WDM que genere esa misma tasa (es decir, 9 u.c. frente a 7.5 u.c.), y también al igual que en [7] se ha supuesto un incremento lineal del coste con la tasa máxima soportada. Según dicho modelo, el coste de un transpondedor heterogéneo capaz de generar una tasa máxima de 300 Gb/s sería el mismo de uno homogéneo capaz de generar esa misma tasa binaria (pues en [7] no se hacen ese tipo de distinciones). En este estudio se supondrá que esa flexibilidad adicional implica un coste extra equivalente al de pasar de 300 a 400 Gb/s en un transpondedor homogéneo. El resumen de estas cuestiones se muestra en la Tabla 2.

Transceptor	Tasa binaria por <i>slot</i> – Tasa máxima total	Coste (u.c)	Alcance máximo (saltos)
Homogéneo - QPSK	10 Gb/s – 100 Gb/s	9	16
Homogéneo - 16QAM	20 Gb/s – 200 Gb/s	18	4
Homogéneo - 64QAM	30 Gb/s – 300 Gb/s	27	1



<b>Heterogéneo</b>	Según subportadoras – Hasta 300 Gb/s	36	Según tipo de subportadora
--------------------	---	----	-------------------------------

Tabla 2. Valores de capacidad (Gb/s), coste (u.c) y alcance máximo transparente (km), respecto al formato de modulación [6, 7, 10].

Una vez entendido los diferentes costes en los distintos escenarios, para calcular el capex lo que se hará es multiplicar el número de transpondedores por el coste de cada transpondedor.

$$capex_{totaltranspondedores} [u. c.] = \sum_{nodo} capex_{transpondedoresnodo} \quad (1.1)$$

$$capex_{transpondedoresnodo} [u. c.] = n^o transpondedoresnodo \cdot coste_{transpondedor} \quad (1.2)$$

### Amplificadores

Los equipos amplificadores están formados por dos amplificadores de fibra dopado con Erblio (EDFA), uno en cada sentido de la fibra y el coste de cada uno de ellos es de 1 u.c. Es por ello que el coste de un amplificador, debido a la bidireccionalidad que se acaba de comentar, será 2 u.c.

Elemento	Coste (u.c.)
Amplificador	2

Tabla 3. Valores de coste (u.c) por amplificador [6, 7].

Por tanto, el capex de los amplificadores será:

$$capex_{totalamplificadores} [u. c.] = \sum_{enlace} capex_{amplificadoresenlace} \quad (1.3)$$

$$capex_{amplificadoresenlace} [u. c.] = n^o amplificadoresenlace \cdot coste_{amplificador} \quad (1.4)$$

En este caso con el número de amplificadores se hace referencia al número de equipos amplificadores bidireccionales por enlace.

### Optical cross-connects (OXCs)

Están compuestos por diferentes elementos. Uno de ellos son los *Wavelength Selective Switches* (WSS), que se encargan de seleccionar la longitud de onda dentro del OXC y son los más influyentes a nivel de coste. Es por ello que a la hora de realizar el estudio del coste de los OXCs se tendrá en cuenta solo el coste de los WSS. Dicho coste, para los WSS flexibles es 5.

Elemento	Coste (u.c.)
WSS	5

Tabla 4. Valores de coste (u.c) por WSS [6, 7].

En cada OXC se necesita un WSS por cada fibra unidireccional y además en la etapa inicial de *add/drop* se requieren dos WSS adicionales (un conmutador para añadir y otro para extraer). Finalmente, a mayores, también se requiere un par de WSS extras para cada grupo de canales adicionales, en bloques de nueve unidades.

Con todo ello el número de WSS [6, 7] que se necesitan son:

$$\text{Número WSS}_{s_{nodo}}[u. c.] = (f + 2 + 2 \cdot \left\lceil \left( \frac{a - 9}{9} \right) \right\rceil) \quad (1.5)$$

Siendo  $f$  el grado del nodo, es decir, el número de fibras unidireccionales con las que está conectado el nodo.

Y siendo  $a$ : Si  $0 < \alpha \leq 9$  entonces  $a = 9$ .  
Si  $\alpha > 9$  entonces  $a = \alpha$ .

Realmente se considerará también que  $a = 9$  cuando  $\alpha = 0$ .

Como se puede ver  $a$  depende de  $\alpha$  siendo esta última el valor máximo entre el número de *lightpaths* entrantes y salientes del nodo, como se muestra en la ecuación:

$$\alpha_{nodo} = \text{máx}(Tx_{nodo_{utilizados}}, Rx_{nodo_{utilizados}}) \quad (1.6)$$

El coste de los OXC viene determinado por:

$$capex_{total_{oxc}}[u. c.] = \sum_{nodo} capex_{oxc_{s_{nodo}}} \quad (1.7)$$

$$capex_{oxc_{s_{nodo}}}[u. c.] = n^{\circ} \text{equipos WSS}_{nodo} \cdot \text{coste}_{WSS} \quad (1.8)$$

### Equipamiento de tráfico IP

El coste de los equipos IP/MPLS se muestra en la tabla a continuación, diferenciándose por el número máximo de puertos de cada uno de los tipos. La capacidad de cada equipo (Gb/s) y el coste vienen determinados por el máximo número de puertos.

Máximo número de puertos	Capacidad (Gb/s)	Coste(u.c.)
4	160	45
8	320	67.5
16	640	97.5
32	1280	337.5
64	2560	752.85

Tabla 5. Valores de capacidad (Gb/s) y coste (u.c) respecto el máximo número de puertos por equipamiento IP [6, 9].

A la hora de calcular el capex del equipamiento IP se ha tenido en cuenta los nodos IP/MPLS de manera que el coste total es igual a la suma de los costes de los distintos

equipos IP disponibles en la red, los cuales dependen de las características de cada uno de ellos.

$$capex_{total\text{equipamiento IP}}[u.c.] = \sum_{nodo} capex_{equipamiento IP\text{nodo}} \quad (1.9)$$

En los estudios que se han realizado, y que se mostrarán más adelante, los nodos IP debían estar dimensionados con un número de puertos superior a los de la Tabla 5, lo cual planteaba un problema de cara a los costes. La Figura 12 muestra los costes de los nodos en función del número de puertos y distintos modelos para determinar los costes en el caso de tener nodos de mayor tamaño.

Una primera opción consiste en aproximar los costes mediante regresión lineal considerando dos zonas: nodos de hasta 16 puertos y nodos de más de 16 puertos. La aproximación se muestra en la Figura 12 y queda:

$$capex_{equipamiento IP\text{nodo}}[u.c.] = \begin{cases} 3,2857 \cdot n^{\circ} \text{puertos}_{nodo} + 30, & \text{si } n^{\circ} \text{puertos}_{nodo} < 16 \\ 13,5569 \cdot n^{\circ} \text{puertos}_{nodo} - 110,1750 & \text{si } n^{\circ} \text{puertos}_{nodo} \geq 16 \end{cases} \quad (1.10)$$

Como se verá más adelante, a la hora de calcular los costes de reparación y sustitución de los equipos se necesita conocer el capex por cada puerto IP. Si se divide la ecuación anterior por el número de puertos, el modelo que queda sigue dependiendo del número de puertos por nodo y eso obliga a tener dimensionada la red a priori. Por simplificar el análisis, de modo que no sea necesario dimensionar la red a priori para conocer el número de puertos por nodo, interesaría tener un modelo en el que el capex por puerto fuera constante. Para ello, se ha planteado un segundo modelo que realiza una regresión lineal de los datos forzando además a que dicho modelo pase por el origen. De esta forma,

$$capex_{equipamiento IP\text{nodo}}[u.c.] = 11.2284 \cdot n^{\circ} \text{puertos}_{nodo} \quad (1.11)$$

Por tanto, con este modelo (también mostrado en la Figura 12) el capex por puerto es constante e igual a 11.2284 u.c. Este será el modelo que se use en este trabajo.

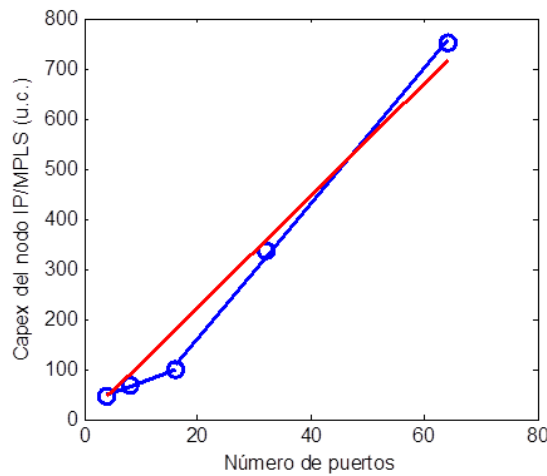


Figura 12. Modelos de capex de un nodo IP/MPLS en función del número de puertos. Se muestra en azul el modelo lineal de dos tramos (así como los datos originales de la tabla) y en rojo el modelo lineal pasando por el origen.

## Capex total

Finalmente se expone la fórmula calcular el capex total es:

$$\begin{aligned} CAPEX_{total}[u. c.] &= capex_{total_{amplificadores}} + capex_{total_{transpondedores}} \\ &+ capex_{total_{equipamiento IP}} + capex_{total_{OXC}} \end{aligned} \quad (1.12)$$

## 2. Costes debido al uso y funcionamiento de la red (opex)

### Cálculo del Opex

#### Calculo del opex por consumo de potencia

Mediante la reducción del consumo de potencia, además de mejorar los efectos en el medio ambiente, se disminuyen los costes asociados al consumo de energía.

#### Transpondedores

Los transpondedores para redes ópticas elásticas tienen que presentar cierta flexibilidad ya que deben ser capaces de variar el número de subportadoras que generan, e incluso permitir variar el tipo de modulación. En este sentido y en relación con la potencia, para realizar los cálculos lo que se hará es que dependiendo del tipo de modulación de cada subportadora, la potencia que consumirá será diferente, es decir, se calculará la potencia como la suma total de las potencias consumidas por cada subportadora.

$$potencia_{total_{transpondedores}}[W] = \sum_{conexión} potencia_{transpondedores_{conexión}} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} potencia_{transpondedores_{conexión}}[W] &= n^{\circ} subportadoras_{nodo_{QPSK}} \cdot 108.163 \\ &+ n^{\circ} subportadoras_{nodo_{16QAM}} \cdot 124.993 \\ &+ n^{\circ} subportadoras_{nodo_{64QAM}} \cdot 141.823 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Para saber la potencia de cada subportadora dependiendo del tipo de modulación (es decir, los números que aparecen en la ecuación anterior) se aplica la siguiente fórmula [8]:

$$potencia_{slot_{subportadora}}[W] = 1.683 \cdot capacidad_{slot_{modulación}} + 91.333 \quad (2.3)$$

Siendo las modulaciones utilizadas: QPSK (10 Gb/s), 16QAM (20 Gb/s) y 64QAM (30 Gb/s).

En este contexto hay que tener en cuenta que los cálculos se realizan por subportadora transmitida, sabiendo que a lo largo de todo el estudio las subportadoras ocupan un ancho de banda de 5 GHz, es decir, un *slot*.

### Amplificadores

Para calcular el consumo de potencia por amplificadores hay que tener en cuenta que tiene un consumo de 30W por sentido en el que se active y una sobrecarga de 140W por cada equipo amplificador, producida por otros equipos, como tarjetas controladoras y ventiladores.

La potencia total de los amplificadores [8] es:

$$\begin{aligned} potencia_{total\ amplificadores} [W] \\ = \sum_{enlace\ equipos\ por\ enlace} \sum potencia_{equipo\ amplificador} \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$potencia_{equipo\ amplificador} [W] = 140 + 30 \cdot n^{\circ} EDFAs\ activos\ en\ el\ equipo \quad (2.5)$$

Si los dos sentidos están activados el consumo de potencia es:

$$potencia_{equipo\ amplificador\ enlace} [W] = 140 + 30 \cdot 2$$

Si solo está activado uno de los sentidos el consumo de potencia es:

$$potencia_{equipo\ amplificador\ enlace} [W] = 140 + 30 \cdot 1$$

### WSS/OXCs

El consumo de potencia se calculará teniendo en cuenta un consumo adicional de 150W debido a otros elementos de estos equipos (tarjetas de controladores y ventiladores). Se calcularía la potencia por cada WSS:

$$potencia_{total\ WSS} [W] = \sum_{nodo} potencia_{WSS\ nodo} \quad (2.6)$$

Siendo la potencia de cada WSS [6, 8]:

$$potencia_{WSS\ nodo} [W] = f \cdot 85 + \alpha \cdot 100 + 150 \quad (2.7)$$

Es decir por cada WSS habría que ver  $f$ , como el grado del nodo, y  $\alpha$ , como el valor máximo entre el número de *lightpaths* que tienen como origen y como destino dicho nodo.

### Nodos IP/MPLS

El consumo de potencia es 10W/Gbps [13], por tanto:

$$potencia_{total\ equipos\ IP} [W] = \sum_{nodo} potencia_{equipo\ IP\ nodo} \quad (2.8)$$

$$potencia_{equipo\ IP\ nodo} [W] = tráfico\ gestionado_{nodo} [Gbps] \cdot 10 \quad (2.9)$$

### Potencia total y coste

Para calcular estos costes previamente se tiene que haber calculado el consumo de potencia total.

$$\begin{aligned}
 potencia_{TOTAL}[W] &= potencia_{total\text{amplificadores}} + potencia_{total\text{WSS}} \\
 &+ potencia_{total\text{equipos IP}} + potencia_{total\text{transpondedores}}
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

Una vez calculado el consumo de potencia se necesitan calcular los costes por dicho consumo. Lo que habrá que hacer es calcular los costes por hora, siendo el coste de kWh de  $2.05 \times 10^{-5}$  unidades de coste por kWh [14].

La ecuación que habrá que aplicar es:

$$OPEX_{potencia}[u.c.] = potencia_{TOTAL}[W] \cdot \frac{0.0000205 \left[ \frac{u.c.}{kWh} \right]}{1000 \left[ \frac{W}{kW} \right]}
 \tag{2.11}$$

### Costes de reparación

Dependen del tiempo medio entre fallos. A continuación se muestran los costes de reparación asociados a cada tipo de dispositivo.

	Coste de reparación (u.c.)
Por fallo de WSS	0.2
Por fallo de transpondedor	0.1
Por fallo de EDFA	0.1
Por fallo de puerto IP	0.1

Tabla 6. Coste de reparación (u.c) por fallo en equipamiento [6, 11].

Para calcular los OPEX relacionados con la reparación y sustitución de los distintos elementos de la red, se utiliza la siguiente ecuación para cada elemento de la red:

$$coste_{equipo\text{reparación+sustitución}}[u.c.] = coste\text{reparación}_{equipo} + capex_{equipo}
 \tag{2.12}$$

Seguidamente se calculan los costes de reparación y sustitución para cada tipo de equipo:

$$\begin{aligned}
 opex_{tipo\ equipo\text{reparación+sustitución}}[u.c./h] &= \frac{\sum_{\text{equipos de cierto tipo}} coste_{equipo\text{reparación+sustitución}}}{MTBF}
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

Siendo MTBF (*Mean Time Between Failures*) el tiempo medio entre fallos expresado en horas. A continuación se suman los costes de todos los elementos y se calcula el coste final:

$$\begin{aligned}
 OPEX_{\text{totales}_{\text{reparación+sustitución}}} & [\text{u. c./h}] \\
 &= \sum_{\text{tipos de equipo}} opex_{\text{tipo equipo}_{\text{reparación+sustitución}}}
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

El tiempo medio entre fallos, se presenta en tres escenarios, optimista, nominal y conservador. En concreto a lo largo del estudio tecno-económico se ha utilizado el MTBF nominal para realizar los cálculos.

MTBF(h)	Optimista	Nominal	Conservador
Por fallo de WSS	-	300 000	-
Por fallo de transpondedor	960 000	350 000	294 000
Por fallo de EDFA	500 000	250 000	10 000
Por fallo de puerto IP	350 000	85 000	10 000

Tabla 7. MTBF(h) optimista, nominal y conservador, por fallo para los distintos equipos de red [6, 11, 12].

### Costes de alquiler y mantenimiento de las instalaciones

El coste del alquiler son 0.27 unidades de coste por metro cuadrado y mes.

	Coste (u.c.)
Por m <sup>2</sup> por mes	0.27

Tabla 8. Coste de alquiler por metro cuadrado y mes [6, 11].

Para calcular este coste se consideran los *slots* de los equipos (como aclaración mencionar que no se trata de *slots* frecuenciales sino de los *slots* que ocupa físicamente el equipo en los *racks* de las instalaciones del operador):

Equipos	Slots	
Transpondedores	1	
WSS	2	
Equipos IP	4 puertos	4
	8 puertos	8
	16 puertos	16
	32 puertos	32
	64 puertos	64

Tabla 9. Slots para los distintos equipos de red.

Siendo el número de *slots* totales:

$$\begin{aligned} slots_{\text{totales}_{\text{nodo}}} &= slots_{\text{OXC/WSS}_{\text{nodo}}} + slots_{\text{transpondedores}_{\text{nodo}}} \\ &+ slots_{\text{nodos IP/MPLS}_{\text{nodo}}} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Lo que habrá que hacer es calcular el número total de *slots* por nodo y a continuación obtener el número total de metros cuadrados por *rack*.

Una vez obtenidos el número total de *slots* por nodo, por cada 16 o menos se obtiene 1 *shelf*, por cada 4 o menos *shelves* se obtiene un *rack*, y por cada *rack* se requieren 0.642 m<sup>2</sup>.

<i>Slots por Shelf</i>	<i>Shelves por Rack</i>	<i>Metros cuadrados por Rack</i>
16	4	0.642

Tabla 10. Análisis del número de metros cuadrados por *slots*, por *shelves* y por *racks*.

Con los metros cuadrados calculados, basta con multiplicarlos por 0.27 unidades de coste por mes y se obtendrá el coste por alquiler y mantenimiento.

El cálculo del opex total por alquiler y mantenimiento se realiza haciendo primero el cálculo de los *slots* por nodo:

$$shelves_{\text{nodo}} = \left\lceil \frac{slots_{\text{totales}_{\text{nodo}}}}{16} \right\rceil \quad (2.16)$$

$$racks_{\text{nodo}} = \left\lceil \frac{shelves}{4} \right\rceil \quad (2.17)$$

$$metros_{\text{cuadrados por rack}_{\text{nodo}}} = racks \cdot 0.642 \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} OPEX_{\text{alquiler+mantenimiento}_{\text{nodo}}} [u. c./h] &= metros_{\text{cuadrados por rack}_{\text{nodo}}} \cdot 0.27 \cdot \frac{u. c.}{mes} \cdot \frac{1 \text{ mes}}{30 \text{ día}} \\ &\cdot \left( \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} \right) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Siendo el opex total por alquiler y mantenimiento [12]:

$$OPEX_{\text{total}_{\text{alquiler+mantenimiento}}} [u. c./h] = \sum_{\text{nodo}} OPEX_{\text{alquiler+mantenimiento}_{\text{nodo}}} \quad (2.20)$$

Este parámetro, aunque forma parte de los OPEX, realmente es un parámetro relacionado con la instalación de los equipos. Aunque estén encendidos o apagados el coste de arrendamiento es constante.



**Opex total**

Finalmente se calcula el opex total:

$$\begin{aligned} OPEX_{total}[u. c.] &= OPEX_{potencia} + OPEX_{alquiler+mantenimiento} \\ &+ OPEX_{reparación+sustitución} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Este concepto se comprenderá mejor a lo largo de los siguientes capítulos cuando se analicen los resultados obtenidos.



## Capítulo V

---

# Análisis tecno-económico de una red óptica elástica

---

El simulador en el que se basa este trabajo, pretende evaluar el coste de una misma red en relación a su compromiso con la probabilidad de bloqueo de ancho de banda cuando se aplican distintas políticas de *grooming*, tanto en un escenario con un solo formato de modulación, como en el caso de que se apliquen distintos formatos a la vez. Para entender mejor el funcionamiento y los modos de operación de este simulador es interesante consultar el Anexo.

Aunque en estudios previos se analizara el opex y la probabilidad de bloqueo de ancho de banda (BBR), este análisis era independiente y no se podía concluir cuál era la combinación de algoritmo y política de *grooming* más conveniente, dado que la BBR obtenida no era comparable en los escenarios simulados. Es por ello que en el presente capítulo lo que se ha buscado es dimensionar la red aproximando la BBR a  $10^{-3}$  como valor de referencia en todos los puntos de estudio, de manera que con una BBR más próxima, entre las distintas combinaciones, se pueda ver cuál es el resultado más económicamente viable. Con todo ello se busca concluir si realmente compensa el uso de transpondedores heterogéneos, o es mejor mantener el uso de transpondedores homogéneos que aunque desperdicien ancho de banda pueden ser más asequibles económicamente.

A continuación se van a presentar los análisis numéricos tras realizar las simulaciones correspondientes.

### 1. Aspectos previos

Hay que tener en cuenta que en base al artículo de Zhang et al. [3], se ha buscado mantener lo máximo posible el contexto de simulación y los resultados obtenidos.

Es por ello que las suposiciones que se han hecho en cuanto a número de *slots* frecuenciales disponibles son coherentes con la documentación [1, 3] para validar la operación del simulador (se consideran 200 *slots*).

En este contexto para mantener la compatibilidad (en la mayor medida posible) con lo expuesto en el artículo de Zhang et al. [3] se ha decidido que el tamaño de *slot* es de 5 GHz.

### 2. Primer estudio: Estudio del impacto del tipo de transpondedor y de los algoritmos de *traffic grooming* sin dimensionado previo

En primer lugar se va a realizar un estudio, consistente con el trabajo de Zhang et al. [3], en el que no se realiza un dimensionado previo de la red. Si para establecer una nueva conexión es necesario añadir un nuevo recurso, por ejemplo, un transmisor, se añade directamente con tal fin de no bloquear la conexión.

Se hace de gran interés en este estudio entender el fuerte compromiso entre la probabilidad de bloqueo de ancho de banda (BBR, *Bandwidth Blocking Ratio*) y el impacto que supone en ella el uso de diferentes tipos de transpondedor y algoritmos de control en relación con el coste económico. La BBR se define como el cociente entre el ancho de banda de las peticiones bloqueadas y el ancho de banda total de las peticiones de conexiones que se solicitan [3]. Puesto que, al contrario que en [3], en este trabajo se consideran distintas modulaciones, para permitir una mejor comparativa de las distintas opciones, la medida del espectro se ha hecho en todos los casos referida a lo que utilizaría una modulación QPSK. Por lo tanto, en la práctica, aunque se mantiene el nombre de BBR por analogía con [3], la BBR realmente se ha calculado como el cociente entre la suma de las tasas binarias asociadas a las peticiones bloqueadas y la suma de las tasas binarias asociadas a todas las peticiones solicitadas. Por último, mencionar que en este estudio la BBR es debida o a la falta de recursos a nivel de equipamiento, o a la falta de espectro o bien a problemas con el medio físico.

Para entender inicialmente este impacto, se va a ver primeramente el resultado de las simulaciones para un escenario homogéneo, es decir, en el que los transpondedores generan un solo tipo de modulación (Figura 13), aunque cabe destacar la diferencia entre un medio físico ideal (Figura 13) y real (Figura 14). En el primer caso no se produce bloqueo de las peticiones por el alcance físico, mientras que en el segundo caso sí, es decir, en el primer caso, el único recurso que es fijo y no se aumenta es el espectro disponible, de modo que los eventos de bloqueo se deben únicamente a la no disponibilidad de espectro.

Obviamente, con un medio físico ideal, los mejores resultados se obtienen para la modulación 64QAM por hacer un uso más eficiente de los recursos espectrales disponibles. Dado que a lo largo de este estudio las pruebas se han realizado para un medio físico real, a partir de este momento el estudio se va a centrar en los resultados que se muestran en la Figura 14.

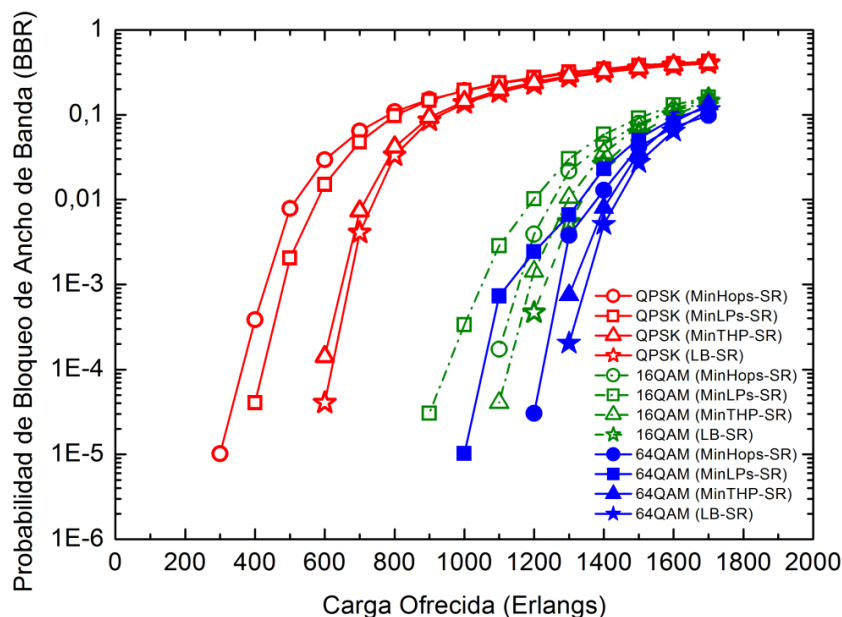


Figura 13. Diferentes probabilidades de bloqueo de ancho de banda para un escenario con un solo formato de modulación, asumiendo medio físico ideal.

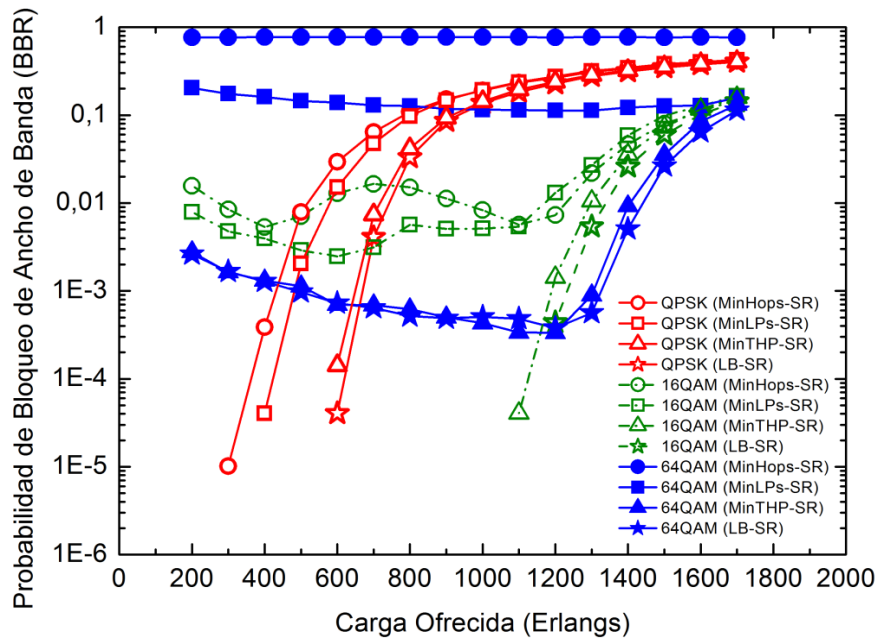


Figura 14. Diferentes probabilidades de bloqueo de ancho de banda para un escenario con un solo formato de modulación, asumiendo medio físico real.

Lo primero que se puede ver en este sentido es que 16QAM es el formato de modulación que generalmente obtiene los mejores resultados en términos de BBR (en concreto, mediante la utilización de las políticas MinTHP-SR y LB-SR). Sin embargo, para las cargas altas, es el formato de modulación 64QAM el que consigue los mejores resultados (de nuevo con las políticas MinTHP-SR y LB-SR). El inconveniente de este último formato de modulación es que este escenario debe ser evitado por los operadores de red debido a que la BBR es demasiado alta incluso para cargas bajas. Esto se debe a que el alcance óptico de 64QAM es sólo un salto. Esto conduce a una BBR muy elevada para todas las cargas de tráfico, excepto cuando se utilizan las políticas MinTHP-SR o LB-SR, ya que estas dos políticas por lo general conducen a establecer precisamente *lightpaths* de un solo salto.

Un mejor uso de los recursos de la red puede venir por medio de la utilización conjunta de los diferentes formatos de modulación. Es por ello que una vez entendidos los resultados para un escenario homogéneo, se va a ver lo que ocurre cuando el escenario es heterogéneo. Este escenario permite que un mismo transpondedor utilice el tipo de modulación más adecuada en función del tipo de conexión a establecer: modulaciones espectralmente eficientes (como 64QAM) si la distancia es corta y modulaciones robustas (como QPSK) si la distancia es larga. Por lo tanto, lo que se ha hecho es ampliar el trabajo de Zhang et al. mediante el análisis de este escenario. Los resultados se pueden ver en la Figura 15, en la cual se han mostrado algunos resultados del escenario homogéneo, para que se pueda ver la diferencia entre los distintos escenarios.

Para simplificar la figura, sólo se representan los resultados de las cargas y los algoritmos donde  $BBR < 10^{-3}$ . Por otra parte, y por la misma razón de simplificar la figura, algunas de las políticas no han sido incluidas en el mismo. Por ejemplo, para el escenario heterogéneo, sólo están representadas tres políticas (MinTHP-SR no se representa debido a que se obtienen resultados casi iguales en términos de costes con LB-SR).

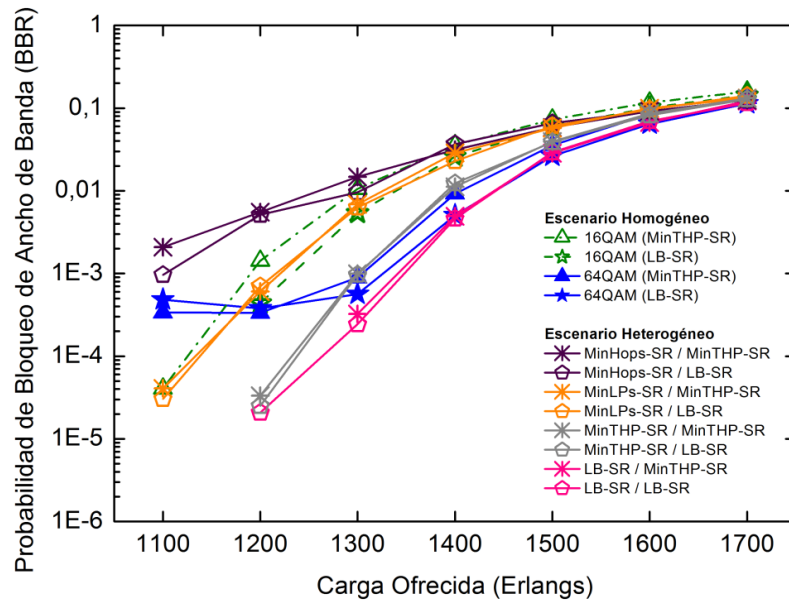


Figura 15. BBR para diferentes políticas en un escenario heterogéneo asumiendo un medio físico real. Para fines comparativos también se muestran los resultados de las políticas y formatos de modulación más eficaces en términos de BBR para los escenarios homogéneos (sólo se representan cargas de alto tráfico).

Hay que recordar en este punto que cuando se recibe una petición, el grafo auxiliar se construye y los pesos se ajustan de acuerdo a las políticas utilizadas. A continuación, se evalúa la primera combinación posible para servir a esa petición (las combinaciones se encuentran detalladas en la Tabla 1). Si la ruta de menor coste implica atravesar o crear *lighpaths* de mayor distancia óptica que la permitida, la solución tendrá que ser eliminada, y se deberá re-construir de nuevo el grafo auxiliar comprobando de nuevo la viabilidad de la siguiente combinación. Cabe destacar que la combinación alternativa que se obtiene requiere más *slots* por enlace que la anterior. Sin embargo si ninguna de las combinaciones para una petición tiene éxito (ya sea debido a las limitaciones de alcance óptico o la falta de recursos de la red), se bloqueará la solicitud de conexión.

Para una mayor simplicidad, además se ha hecho uso de la política de que si una conexión es encaminada a través de diferentes *lightpaths*, se deberá utilizar la misma combinación de subportadoras en todos ellos.

Por otra parte, para las combinaciones que utilizan subportadoras 64QAM, sólo se utilizan las políticas MinTHP-SR y LB-SR (por las razones expuestas al explicar la Figura 15). Por lo tanto, se representa a las políticas como Política-1/Política-2, donde Política-1 es la política utilizada en la construcción del grafo auxiliar para todas las combinaciones excepto para aquellas con uso de subportadoras 64QAM, que utilizan Política-2.

Una vez entendido el contexto de simulación, se va a analizar el promedio de los gastos operativos, representado en la Figura 16. Es importante remarcar que se está comparando el OPEX medio para las diferentes políticas en función de la carga ofrecida, pero, dado que no se ha dimensionado a priori, las políticas tienen diferentes valores en términos de BBR para una misma carga.

Como se puede ver en la Figura 16, cuando aumenta la carga ofrecida, los costes operativos aumentan y eso se debe a que el número de dispositivos activos aumenta dado que se hacen necesarios más recursos para cursar todo el tráfico de las peticiones.

Si se analizan las políticas MinTHP-SR y LB-SR, se puede ver como son las más eficaces en términos de probabilidad de bloqueo de ancho de banda (lo cual se puede ver en la Figura 15); Sin embargo, conducen a costes más altos (Figura 16). Por el contrario, MinHops-SR ofrece los peores resultados en términos de BBR, pero conduce a costes más bajos que el resto de las políticas. Aunque no se muestre gráficamente, el análisis de los resultados es similar para el caso de las gráficas del CAPEX. Por último, cabe señalar que cuando se utilizan transpondedores heterogéneos, todas las políticas conducen a  $BBR < 10^{-3}$  hasta, al menos, 1000 Erlangs, permitiendo así el uso de políticas eficaces en costes como MinHops - SR.

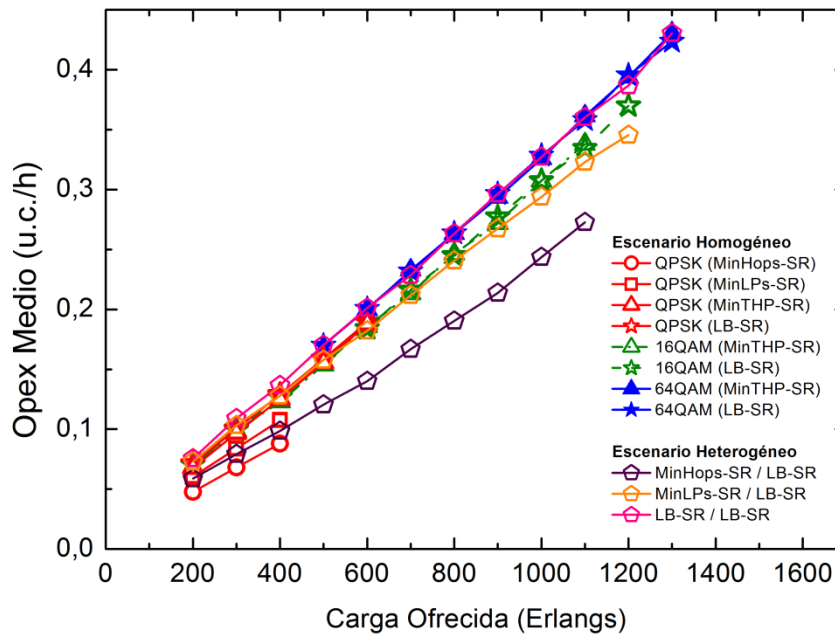


Figura 16. OPEX para las diferentes políticas que asumen un medio físico realista (todos los resultados mostrados cumplen esa  $BBR < 10^{-3}$ ).

En cualquier caso, la comparativa de la Figura 16 debe ser tomada con cautela. Aparentemente la combinación de transpondedores heterogéneos con un algoritmo como MinHops-SR parece la más económica, pero si se ve la Figura 15 se observa que da lugar a BBR mayores que otras alternativas, y esto se debe a que no se ha realizado una etapa de dimensionado previo. Por lo tanto, para hacer una comparativa más realista, sería necesario dimensionar la red en cada caso de modo que en todos los casos las distintas combinaciones de tipo de transpondedor y algoritmo den lugar a las mismas prestaciones en términos de BBR para una misma carga de tráfico y comparar los costes en esas condiciones. Ese es el objetivo del siguiente apartado.

### 3. Segundo estudio: Estudio del impacto del tipo de transpondedor y de los algoritmos de *traffic grooming* con dimensionado previo

Una vez vistos los resultados en las simulaciones en el caso sin dimensionado previo, lo que se va a ver a continuación es una comparativa del capex y del opex en el que caso de que los algoritmos y modulaciones se encuentren con una misma probabilidad de bloqueo de ancho de banda. Al igualar todos los escenarios a una misma BBR se consigue ver de manera más clara una comparativa entre el impacto del coste de transpondedores homogéneos y heterogéneos y de los algoritmos de *traffic grooming*.

Como se puede ver en la Figura 15 y la Figura 16 hay algoritmos más eficientes en coste (como MinHops) pero peores en términos de BBR. Mientras que hay transpondedores heterogéneos que, aunque son más caros, permiten reducir la BBR. Con todo ello, la hipótesis que se plantea hasta el momento es que quizás usar un transpondedor heterogéneo (aunque fuera más caro en un principio) con un algoritmo eficiente en costes fuera globalmente la opción más económica. Es por ello que en este apartado lo que se busca es verificar dicha hipótesis.

Lo primero que se va a ver son los escenarios y políticas que se han decidido analizar, para entender mejor los resultados:

- Escenario Homogéneo con política LB-SR y modulación QPSK.
- Escenario Homogéneo con política LB-SR y modulación 16QAM.
- Escenario Homogéneo con política LB-SR y modulación 64QAM.
- Escenario Heterogéneo con política MinTHP-SR / LB-SR.
- Escenario Heterogéneo con política MinHops-SR / LB-SR.
- Escenario Heterogéneo con política LB-SR/LB-SR.

Para realizar dicha comparativa el procedimiento que se ha seguido es el siguiente:

- **PASO 1:** Lo primero que se ha hecho es buscar el número de recursos necesarios, en cada escenario y política comentados, para la carga que proporciona una BBR en torno a  $10^{-3}$ . Como ejemplo, en el caso del escenario homogéneo con política LB-SR y modulación QPSK que se muestra en la Figura 14, se puede ver que para conseguir la BBR deseada se necesita una carga de 700 Erlangs, de manera que lo que se ha hecho es conseguir el número de recursos para esa carga y ese algoritmo.
- **PASO 2:** Se configura el simulador para usar el algoritmo anterior con los recursos obtenidos por nodo, de modo que si la petición necesita un mayor número de recursos de los que se han establecido (por ya estar ocupados), la petición se bloqueará.
- **PASO 3:** A continuación se multiplica por 0.9 los recursos (dimensionado del 90%). Se vuelven a repetir las simulaciones y se busca la nueva carga para obtener una BBR de  $10^{-3}$ . Puesto que ahora se dimensiona la red con menos recursos, esa BBR se alcanzará con una carga ofrecida más baja. En ese momento se anotan el CAPEX y OPEX para la carga seleccionada.
- **PASO 4:** Se repite el paso 3 sucesivamente multiplicando el número de recursos por otros factores hasta que se obtengan las gráficas para BBR, OPEX y CAPEX.

### **Análisis de la probabilidad de bloqueo de ancho de banda**

Una vez entendido el procedimiento de estudio realizando un dimensionado previo de la red, lo primero que se va a comprobar es que las simulaciones que se van a analizar tienen una BBR en torno a  $10^{-3}$ , lo cual se puede ver en la Figura 17.

Aunque no se han conseguido valores exactos de  $10^{-3}$ , gracias al dimensionado previo, los resultados entre las distintas combinaciones de tipo de transceptor y política de *traffic grooming* son más parecidos entre sí que en la Figura 15 (donde no había



dimensionado previo). Sería posible obtener unas gráficas aún más similares entre sí (y más próximas a una BBR de  $10^{-3}$ ), pero eso obligaría a ir probando con valores de carga más finos de lo que se ha hecho (en esta prueba se ha ido variando la carga en pasos de 50 Erlangs) o factores de dimensionado más finos (se han ido variando en pasos de 0.1). Se han representado dos curvas para el caso de transceptores homogéneos QPSK y política LB-SR. Una de ellas se corresponde con un dimensionado que da lugar a una BBR ligeramente por encima de  $10^{-3}$  y otra ligeramente por debajo.

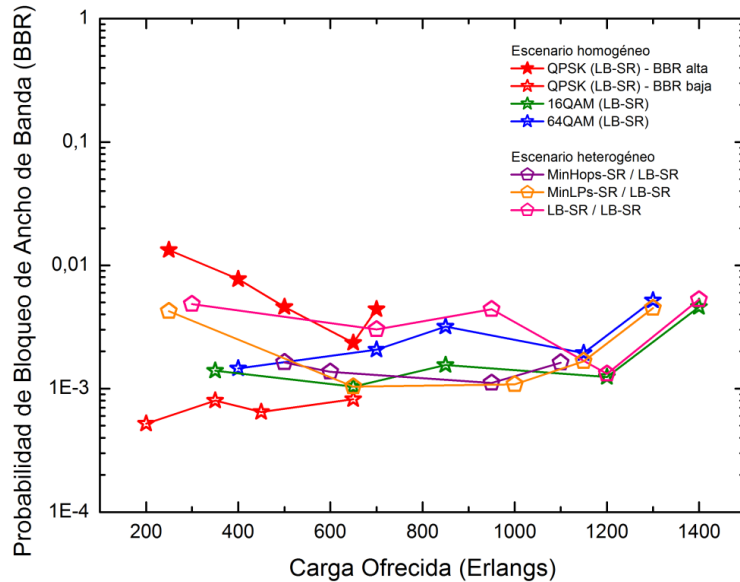


Figura 17. BBR para diferentes políticas, tanto en un escenario homogéneo como heterogéneo, asumiendo un medio físico realista.

Por otro lado, como se puede ver en la imagen tanto el algoritmo LB-SR con una modulación QPSK y el algoritmo MinHops-SR/LB-SR son gráficas incompletas, ya que faltan puntos para cargas altas. Esto se debe a que, aunque se aumente el dimensionado de la red (es decir, se aumente el número de componentes disponibles en la red), no es posible obtener la BBR deseada a partir de ciertas cargas. Es de interés entender el porqué de esta limitación de cargas en algunos escenarios.

Como se comentó anteriormente, la Figura 13 considera medio ideal y no hay limitación en los componentes de la red (si por ejemplo, se requiere un nuevo transmisor para establecer una conexión, se añade con tal de que se establezca dicha conexión). En definitiva, en la Figura 13, sólo hay un motivo de bloqueo: falta de recursos espectrales. Por lo tanto, esa gráfica supone una cota inferior de la BBR. Aunque se añadan más componentes a una red, es imposible mejorar la BBR que muestra esa gráfica (pues lo que limita es el espectro). Por ese motivo, si se necesita una BBR de  $10^{-3}$  y se usa la modulación QPSK con el algoritmo LB-SR, la carga máxima que se puede obtener son 700 Erlangs. La única forma de tener una BBR de  $10^{-3}$  con más de 700 Erlangs sería añadir más recursos espectrales, pero a lo largo del estudio se ha considerado el espectro disponible como algo fijo.

En el caso concreto de la Figura 14 se considera medio físico real, de modo que hay bloqueo por falta de recursos espectrales y por problemas del medio físico. Por eso la BBR siempre es mayor o igual que la de la Figura 13. Además, se ve que para cargas bajas dominan los bloqueos debidos al medio físico mientras que para cargas altas dominan los bloqueos por falta de espectro. Cabe destacar el caso concreto de QPSK,

dato que los problemas del medio físico no tienen prácticamente impacto (la BBR es muy similar en ambas gráficas).

En el caso de la Figura 17, existe un nuevo tipo de bloqueo que se añade a los motivos expuestos anteriormente. Ese nuevo tipo es la falta de recursos (componentes) para establecer las peticiones, ya que en este caso el número de componentes es fijo. Por tanto hay bloqueo por falta de espectro, problemas del medio físico y, ahora sí, por falta de componentes.

Para entender lo expuesto se va a ver las gráficas de la BBR para cada dimensionado, para un mismo algoritmo y modulación.

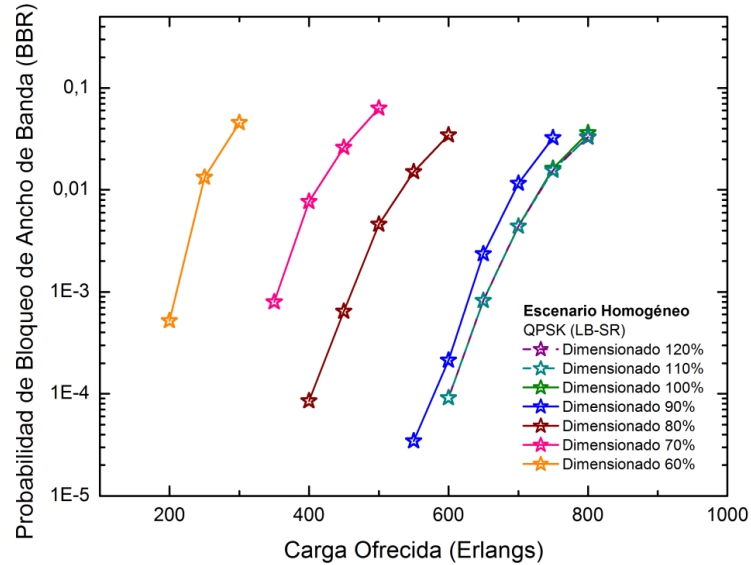


Figura 18. BBR Media para cada dimensionado de recursos con variación de cargas para un algoritmo LB-SR y modulación QPSK.

En este caso se puede ver como al aumentar el dimensionado las gráficas de la BBR son prácticamente iguales, lo que supone que, aunque aumente el número de componentes, la probabilidad de bloqueo será la misma (los recursos espectrales son el factor limitante).

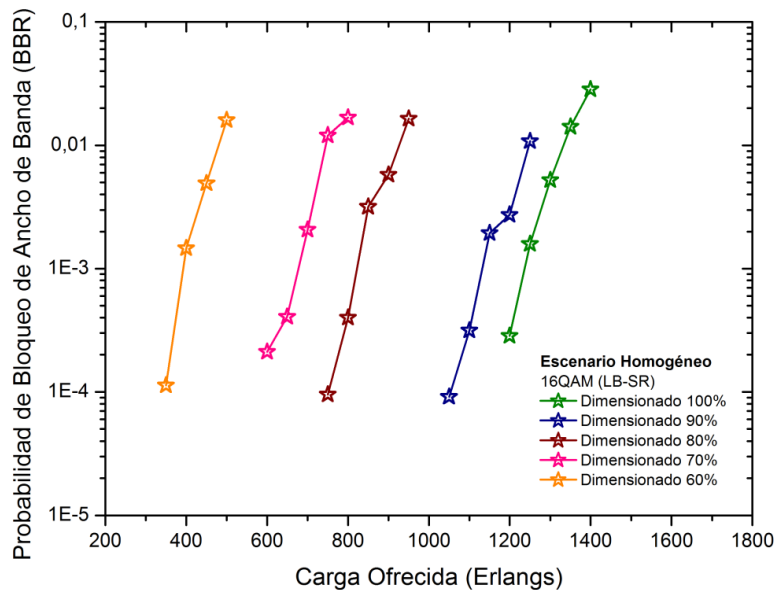


Figura 19. BBR Media para cada dimensionado de recursos con variación de cargas para un algoritmo LB-SR y modulación 16QAM.

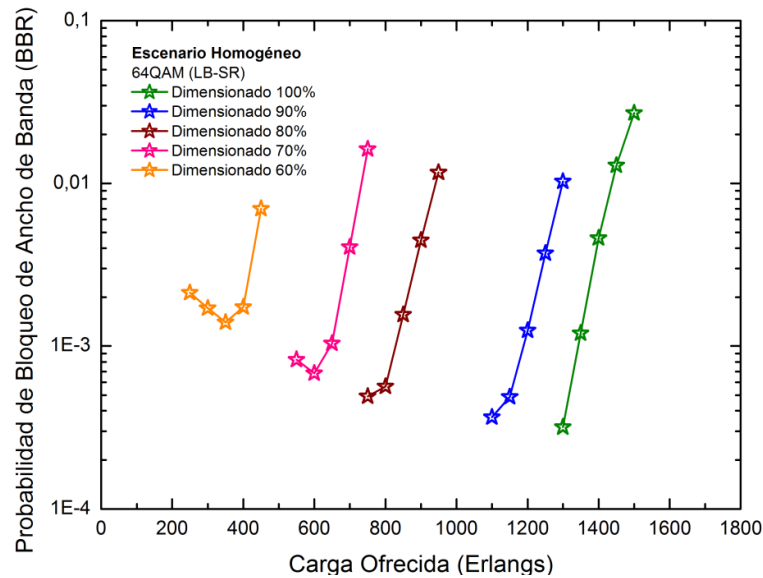


Figura 20. BBR Media para cada dimensionado de recursos con variación de cargas para un algoritmo LB-SR y modulación 64QAM.

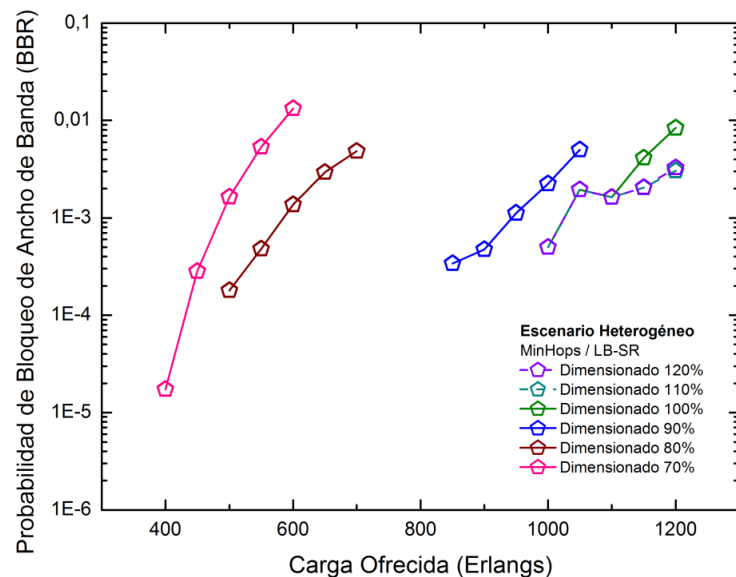


Figura 21. BBR Media para cada dimensionado de recursos con variación de cargas para un algoritmo MinHops-SR/LB-SR.

Nuevamente para el caso del escenario heterogéneo se puede ver el mismo caso que sucedía para el caso del escenario homogéneo con algoritmo QPSK, es decir, al aumentar el dimensionado las gráficas de la BBR son prácticamente iguales. En concreto se puede ver como para un dimensionado de 110% y de 120% las gráficas se solapan, de manera que el aumento del número de recursos da una misma probabilidad de bloqueo de ancho de banda y por tanto, se piensa de nuevo que los recursos físicos no son el factor limitante.

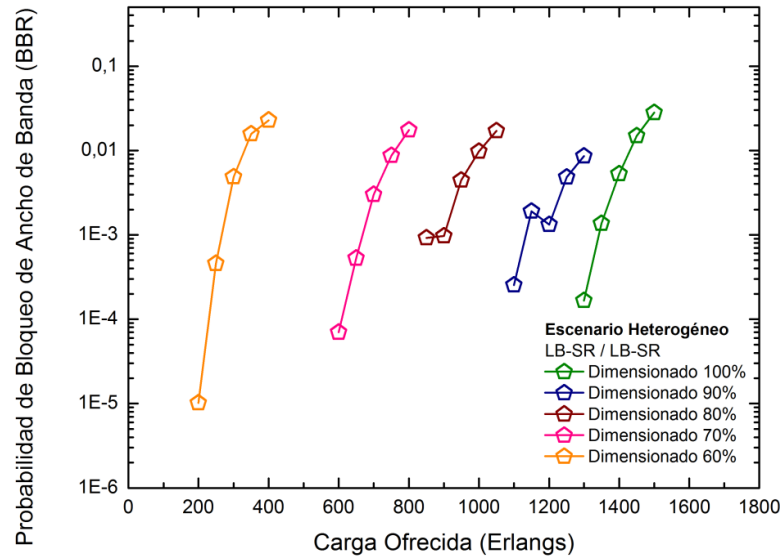


Figura 22. BBR Media para cada dimensionado de recursos con variación de cargas para un algoritmo LB-SR/LB-SR.

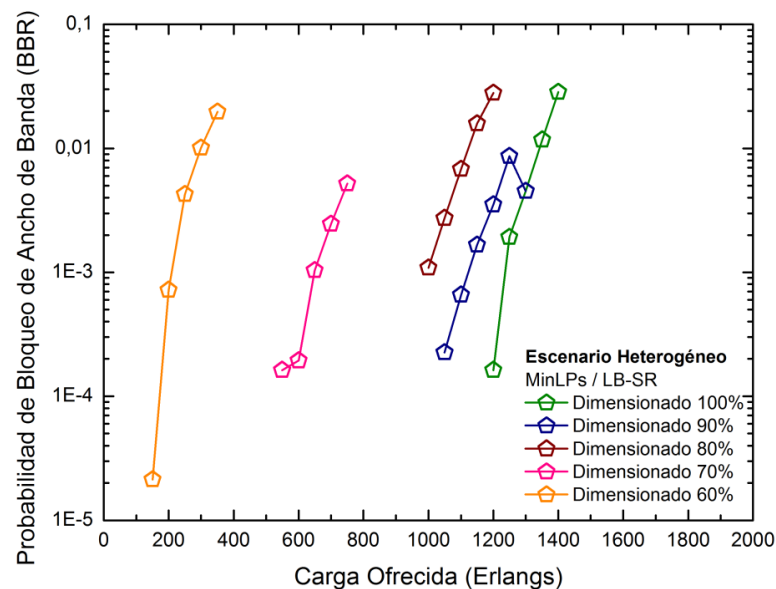


Figura 23. BBR Media para cada dimensionado de recursos con variación de cargas para un algoritmo MinLPs-SR/LB-SR.

En algún caso se observa algún punto cuya BBR parece ligeramente fuera de lugar. Aunque las simulaciones realizadas han sido suficientemente largas y se han utilizado técnicas estadísticas para determinar cuándo finalizarlas, en estos últimos casos se han realizado con una única semilla, por lo que se piensa que promediando con varias semillas se evitarían ese tipo de situaciones.

Resumiendo, se puede concluir que:

- Si se dimensiona al 100%, las gráficas coinciden con las de la Figura 14 y la Figura 15 ya que de esta manera el número de recursos será el mismo que en las condiciones del caso sin dimensionado previo. Por tanto, se asegura que no hay

bloqueos por falta de componentes<sup>1</sup> (solo por falta de recursos espectrales o problemas del medio físico).

- Si se dimensiona a más del 100% (es decir, se añaden más componentes) no se mejora la BBR. La razón es la ya mencionada, en esos casos los bloqueos no son por falta de componentes sino por falta de espectro o por problemas del medio físico, así que añadir recursos no soluciona nada, es decir, no se consigue que una red/modulación/algoritmo soporte más carga garantizando esa BBR.
- Sin embargo, al dimensionar por debajo del 100%, sí hay bloqueos adicionales por falta de componentes y por eso la BBR sale más alta. Obviamente, al bajar el número de componentes disponibles en la red, se bloqueará un mayor número de peticiones y por tanto la BBR aumenta.

En el caso concreto del escenario homogéneo con algoritmo QPSK, no es posible soportar más de 700 Erlangs por la limitación en el espectro disponible y por ello, aunque se añadan más recursos, la limitación de espectro no permite ir más allá.

Una vez vistas las gráficas de BBR lo que se va a hacer a continuación es realizar un análisis del capex y opex en relación con esa probabilidad de bloqueo de ancho de banda.

### Análisis del capex y opex

En este caso, como se puede ver en la Figura 24 el menor capex se obtiene con el escenario homogéneo QPSK (tanto con el dimensionado que daba lugar a una BBR ligeramente inferior a  $10^{-3}$  como con el que daba lugar a una BBR algo por encima). Por otro lado, el escenario heterogéneo con el algoritmo MinHops-SR y el de 16QAM con LB-SR (los siguientes más baratos) tienen un coste muy similar entre sí.

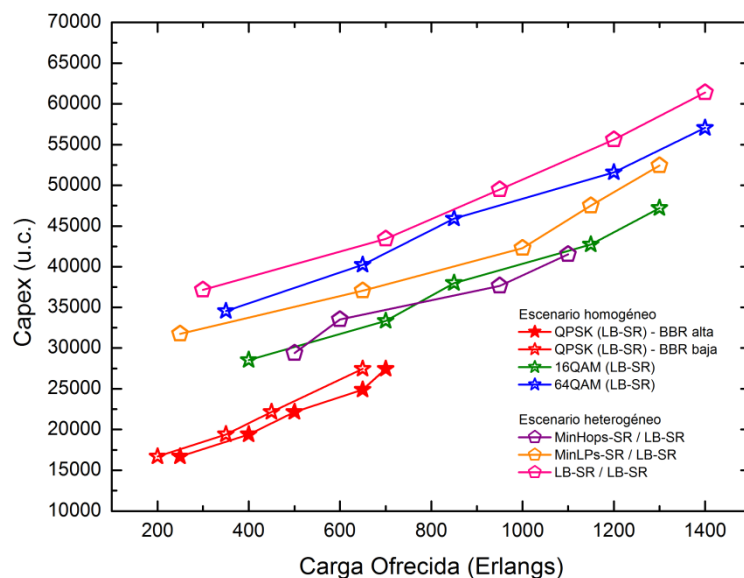


Figura 24. Capex para diferentes políticas, tanto en un escenario homogéneo como heterogéneo, asumiendo un medio físico realista.

<sup>1</sup> Estrictamente hablando sí pueden producirse bloqueos por falta de componentes dependiendo de cómo se generen las peticiones (por ejemplo si se varía la semilla del simulador), pero en cualquier caso esos eventos no son muy significativos y por ello no hay una variación significativa de la BBR.

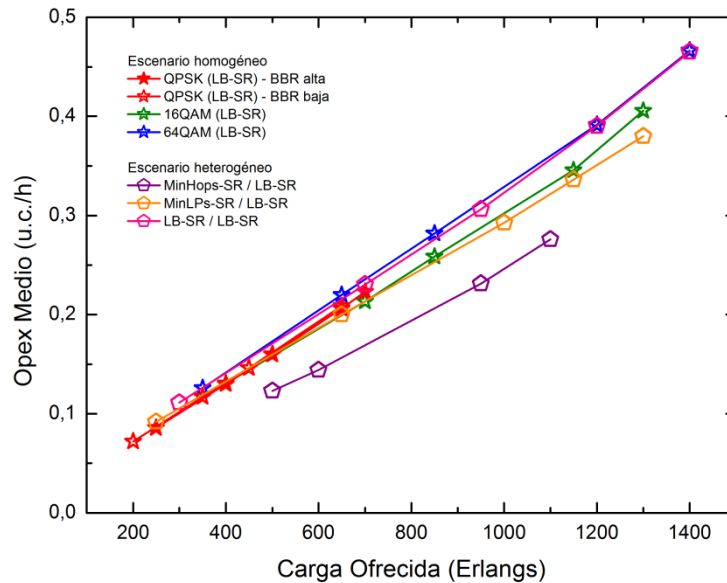


Figura 25. Opex para diferentes políticas, tanto en un escenario homogéneo como heterogéneo, asumiendo un medio físico realista.

Además del capex, es necesario estudiar el opex. Como se puede ver en la Figura 25, el caso del escenario heterogéneo con algoritmo MinHops-SR es el que ofrece menores costes.

### Conclusión

Aunque en términos de capex (Figura 24) un escenario heterogéneo con MinHops es más caro que un escenario homogéneo con QPSK y LB-SR, debe tenerse en cuenta una serie de cuestiones adicionales.

En primer lugar, el uso de transpondedores heterogéneos con MinHops-SR permite que la red pueda operar a cargas más altas garantizando la BBR. Por otro lado, el uso de transpondedores homogéneos 16QAM con el algoritmo LB-SR permite la operación incluso a tasas más altas.

En segundo lugar, el opex para el uso de transpondedores heterogéneos con MinHops-SR es más bajo que el de otras opciones, de modo que a largo plazo podría compensar.

Por ejemplo, para una carga ofrecida de 500 Erlangs el capex para transceptores QPSK (con dimensionado dando lugar a una BBR alta) es 22170 u.c. y para la solución heterogénea es 29390 u.c., es decir, una diferencia de 7220 u.c. Con respecto al opex, para QPSK son 0.1598 u.c./h mientras que para la solución heterogénea son 0.123 u.c./h. Por tanto, una diferencia de 0.0368 u.c./h. Eso implica que en 196195 horas se amortizaría, es decir, en 22 años. Ahora bien, ese es un plazo muy elevado.

Sin embargo, teniendo en cuenta el resultado para QPSK (con dimensionado dando lugar a una BBR baja), el plazo puede variar significativamente. Pero para realizar la misma comparativa, hay que tener en cuenta que no se tienen los resultados para una carga de 500, pero si para cargas de 450 y 650, es por ello, que se obtendrán los resultados mediante interpolación lineal.

En este caso, dado que el capex para QPSK es 23497.5 u.c. y para la solución heterogénea es 29390 u.c., la diferencia es de 5892.5 u.c. Con respecto al opex, dado que para QPSK su valor es 0.1618 u.c./h y para la solución heterogénea es 0.123 u.c./h., la diferencia es de 0.0388 u.c./h. Por tanto, se amortizaría en 151868 horas, es decir, en 17 años. Un plazo inferior que el obtenido con el escenario homogéneo y BBR alta, pero aún así muy elevado.

El primer análisis lleva a la conclusión de que la solución heterogénea sería más barata a partir de 22 años de operación de la red (pero como en ese caso la BBR del escenario homogéneo era mayor que la del heterogéneo, esos años están sobreestimados si se busca la misma BBR, pues realmente habría que dotar de más recursos al escenario homogéneo para bajar la BBR y eso incrementaría sus costes y por tanto se necesitarían menos años para que el coste se igualara). La otra lleva a la conclusión de que la solución heterogénea sería más barata a partir de 17 años de operación de la red (pero como la BBR del escenario homogéneo era menor que la del heterogéneo, ese valor está subestimado si se busca la misma BBR, pues realmente el escenario homogéneo podría tener menos recursos y así disminuir sus costes). En cualquier caso, se está hablando de un plazo comprendido entre 17 y 22 años, y esos son plazos muy elevados teniendo en cuenta el ritmo al que aparecen y se introducen nuevas tecnologías en las redes.

Con todo ello se puede concluir que si las cargas que se espera son bajas (hasta 700 Erlangs), la solución viable más económica, en principio, es el uso de transceptores homogéneos QPSK con la política LB-SR. Si se esperan cargas entre 700 y 1100 Erlangs, la mejor opción sería el uso de transpondedores heterogéneos con la política MinHops-SR, y si se esperan cargas entre 1100 y 1300 Erlangs la mejor opción será el uso de transceptores homogéneos 16QAM con la política LB-SR.

Ahora bien, en la conclusión anterior se ha obviado un aspecto muy importante y es que el tráfico cursado por la red aumenta con el tiempo. Por lo tanto, la carga esperada en la red al comienzo de su operación y la evolución prevista de dicha carga jugará un papel importante a la hora de elegir el tipo de transpondedor y política de *traffic grooming* más adecuada.





---

## Capítulo VI

---

### Conclusiones y líneas futuras de trabajo

---

En este trabajo se ha realizado un estudio tecno-económico de las redes ópticas elásticas. Para ello, se ha extendido un simulador de este tipo de redes basado en OMNeT++ en el que se ha implementado el modelo de costes explicado en el Capítulo IV. Cabe destacar que se ha unificado los dos simuladores, tanto para el escenario homogéneo como para el escenario heterogéneo, con los que se obtuvieron los resultados para el Trabajo Fin de Grado [19] de manera que con un solo simulador se puedan analizar ambos escenarios. Es importante señalar que se ha validado el simulador, comprobando que los resultados eran coherentes con los del trabajo de Zhang et al. [3], y verificando con ejecuciones paso a paso el cálculo correcto de los costes cuando la red soporta distintos formatos de modulación y las distintas políticas de *grooming* propuestas en [3]: *Minimum Number of Lightpaths*, *Minimum Number of Virtual Hops*, *Minimum Number of Traffic Hops in the Physical Network* y *Load-Balancing*, con y sin reserva de espectro.

Además, se ha extendido el simulador para permitir dos modos de operación: uno destinado a dimensionar la red (en el que se añaden componentes en los nodos a medida que se necesitan y se genera un fichero describiendo la configuración de la red) y otro destinado a evaluar las prestaciones de una red previamente dimensionada (se lee un fichero de configuración de la red y se producen bloqueos si no hay componentes disponibles suficientes en los nodos).

Los resultados descritos en el Capítulo V muestran la influencia de los distintos tipos de transceptores (homogéneos/heterogéneos) y de distintas políticas de *grooming* a nivel de capex/opex, y cómo existe un compromiso con respecto al rendimiento en términos de probabilidad de bloqueo de ancho de banda. Es en este sentido en el que resulta muy útil la extensión realizada al simulador, ya que supone un estudio más profundo, al permitir dimensionar la red y luego analizar los costes operativos asociados en condiciones equitativas.

Algunas líneas futuras que se plantean son:

- Analizar la sensibilidad a distintos parámetros, por ejemplo, en lugar de fijar el coste de un transpondedor heterogéneo a un 33% mayor que uno homogéneo 64QAM, estudiar el impacto en los resultados cuando se varía dicho porcentaje.
- Realizar los últimos estudios realizados para distintas semillas de simulación. En este sentido, se puede conseguir hacer un promedio de los resultados obtenidos para distintas semillas de manera que se consiga obtener unos resultados más próximos a la realidad.
- Implementar otros formatos de modulación adicionales a los aquí expuestos, de manera que se estudie el compromiso entre la tasa de bits y el alcance permitidos de manera más global (el simulador ya está preparado para ello).
- Analizar un modelo más realista en la que los enlaces de la red tengan distintas longitudes.

- Plantear un modelo de red donde aparte de usar transpondedores, OXC, puertos IP y amplificadores, se usen otro tipo de recursos como regeneradores, que doten de mayor realismo a la red.
- Analizar en detalle el resultado del dimensionado de la red, determinando, por ejemplo, qué nodos concretos de la red son los que requieren una mayor cantidad de equipamiento y si esa situación es consistente o no en todos los algoritmos de *grooming*.

El ámbito de las redes ópticas elásticas está en continua investigación, es por ello que no cesan los avances y que a parte de los pasos a seguir que aquí se han propuesto puede haber más alternativas.

---

## Anexo

---

### Desarrollo del simulador en OMNeT++

---

La motivación para el desarrollo del simulador es el trabajo de Zhang et al. [3]. Por lo tanto, la primera versión del simulador se desarrolló en [1] y se validó comparando con los resultados de dicho artículo y se fueron implementando nuevas características [1, 18, 19].

Una diferencia significativa con respecto al Trabajo Fin de Grado [19] se encuentra en la unificación de los dos simuladores, que antes estaban separados, en uno solo que abarca tanto el estudio del escenario homogéneo como heterogéneo. Esta novedad permite evitar errores de implementación al intentar replicar el modelo de costes en ambos escenarios. Cabe destacar que esta unificación permite una mayor sencillez de cara a analizar las líneas futuras de trabajo que se muestran en el capítulo VI.

Otra diferencia relevante, y no menos importante, es la implantación de dos modos de operación en el simulador, uno sin bloqueo por falta de recursos al intentar establecer una nueva petición y otro con bloqueo debido a esta falta de equipamiento. Pero estos dos modos se describirán en esta sección más adelante.

Para extender el simulador en términos de análisis de costes se han realizado cuatro funciones adicionales, las cuales están creadas de tal manera que poseen una gran portabilidad y adaptación respecto a otro tipo de escenarios:

- *calculo\_opex()* y *calculo\_capex()*

Dichas funciones realizan el cálculo del modelo de costes de la red óptica elástica simulada.

Dentro de cada función ahora mismo se implementa el capex y el opex, pudiendo ser validado mediante las simulaciones analizadas en el capítulo V.

- *calculo\_media\_ponderada()*

Los resultados que se van almacenando no son ponderados, ya que el cálculo del opex no se realiza de manera periódica, sino cuando se establece o libera una conexión. Es por ello que se tiene que crear una función que pondere los resultados para así poder calcular la media mediante la clase ‘*análisis*’.

- *calculo\_opex\_alquiler()*

Se ha establecido la creación de una función que calcule el coste por alquiler y mantenimiento de la red, mediante un modelo alternativo basado en el modelo de costes explicado en la sección IV.

#### 1. Funcionamiento del simulador basado en OMNET++

Cabe mencionar que para el previo desarrollo del simulador del que parte este trabajo, desarrollado en [1], se ha utilizado la librería LEMON, una librería de código abierto, escrita en lenguaje C++ que proporciona implementaciones de las estructuras de datos y algoritmos comunes relacionados principalmente con grafos y redes. LEMON es parte del proyecto COIN-OR [17].

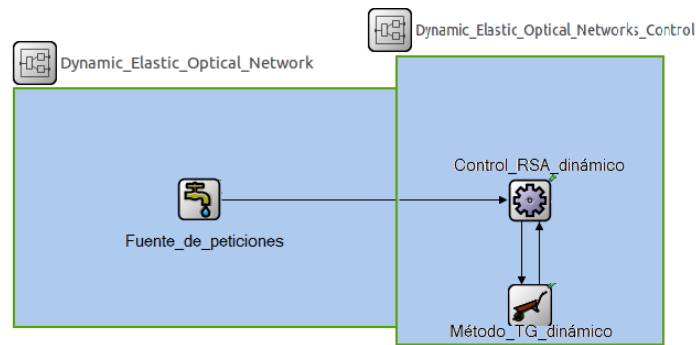


Figura 26. Resumen del intercambio de mensajes entre módulos.

Profundizando en el funcionamiento del simulador que se menciona, los submódulos útiles en el funcionamiento son:

- **Fuente de peticiones**

El submódulo es el encargado de generar las peticiones de conexión eléctrica.

Su funcionamiento básico es sencillo, crea el mensaje correspondiente a la petición, se envía dicho mensaje al módulo de control y se programa para generar otra nueva petición y repetir de nuevo el proceso.

- **Módulo de control**

Cuando el mensaje llega al módulo, este se encargará de extraer la información y procesarla, de manera que se decidirá si establecer o bloquear la petición.

Asimismo este módulo de control se encarga de decidir de manera eficiente la ruta y la frecuencia que se asignará.

Una vez hecho esto el módulo actualizará el estado de la red en el módulo 'estado', que es el encargado de almacenar toda la información relativa al estado de la red en cada momento.

Para llevarlo a cabo el submódulo de control está compuesto por otros dos submódulos: 'Control\_RSA\_dinamico' y 'Metodo\_TG\_dinamico' que llevan a cabo las tareas de establecimiento y liberación de conexiones:

- El submódulo 'Control\_RSA\_dinamico' es el encargado de recibir el mensaje. Cuando lo recibe lo reenvía a 'Metodo\_TG\_dinamico'.
- Por su parte 'Metodo\_TG\_dinamico' es el encargado de implementar el algoritmo. Este algoritmo dependiendo de la política de *grooming* hallará la ruta y la frecuencia más adecuadas o devolverá el *flag* para bloquear la petición. Todos estos datos los empaqueta en un mensaje que envía de vuelta a 'Control\_RSA\_dinamico'.

Profundizando en el contenido del mensaje, si al aplicar el algoritmo de Dijkstra el camino de menor coste define que la conexión se encaminará por *lightpaths* establecidos en la red, entonces el mensaje contendrá la información sobre dichos *lightpaths*, pasándose su identificador, así como la información relativa a la asignación de espectro. Por el contrario

si al aplicar el algoritmo de Dijkstra el camino de menor coste define que la petición se establezca en *lightpaths* nuevos, entonces el mensaje que se envía contendrá una segunda parte en la que se detallarán la secuencia de fibras y el espectro asignado en dichas fibras.

- Finalmente con toda la información el submódulo ‘*Control\_RSA\_dinamico*’ se encargará de actualizar la información contenida en las tablas de conexiones y *lightpaths* del modulo ‘*estado*’.

Además se auto-programa para liberar la conexión cuando el tiempo de servicio ya haya transcurrido.

Estos pasos se realizarán de manera cíclica, estableciendo y liberando conexiones continuamente.

## 2. Modos de operación del simulador

Dado que en el presente trabajo lo que se intenta es aproximar al máximo la implementación a una red óptica elástica real, se van a ver dos modos de funcionamiento:

- **Modo sin dimensionado previo:** En este modo de operación no hay ningún bloqueo de peticiones por falta de recursos. De esta manera se consigue ver el número máximo de recursos que se utilizarían en el caso de que hubiera un número de equipamiento infinito, para lo cual se realiza un seguimiento almacenando al final de la simulación el número máximo de recursos utilizados. Los resultados obtenidos mediante este modo de operación sirven para el análisis de un contexto de simulación ideal y además sirven como punto de partida para el análisis de un entorno realista, mediante la ejecución de simulaciones con un número limitado de recursos.
- **Modo con dimensionado previo:** En este modo de operación el número máximo de recursos se obtiene de un fichero que bien puede ser definido por el usuario, o bien puede ser obtenido al realizar una simulación sin dimensionado previo. Un ejemplo de este fichero se puede ver en la Figura 27.

```
0 16 42 42 224
1 16 41 41 221
2 16 41 41 231
3 18 51 51 271
4 18 50 50 262
5 24 68 68 346
6 12 32 32 199
7 18 51 51 266
8 22 61 61 297
9 12 34 34 214
10 16 43 43 241
11 16 38 38 220
12 16 39 39 211
13 16 44 44 235
```

Figura 27. Ejemplo de fichero con los recursos necesarios para realizar la simulación con dimensionado previo.

En el fichero hay 5 columnas que hacen referencia a: los nodos (hay que recordar que en la red había 14), el número de WSS, el número de transpondedores (haciendo referencia a la parte transmisora y a la parte receptora mediante el uso de dos columnas) y el número de puertos IP.

Mediante este modo de operación se pueden obtener resultados más realistas observando el comportamiento de la red ante un mayor o menor equipamiento.

Cabe destacar, que gracias al fichero de configuración *.ini* se puede introducir los parámetros necesarios que indiquen al simulador en qué modo debe operar. Un ejemplo de dicho fichero se puede ver en la Figura 28.

Los parámetros más relevantes que controlan la simulación, y que se pueden ver en la figura, son:

- *Dynamic\_type\_transmitter*: Indica el tipo de transpondedor que se utilizará a lo largo de la simulación, de manera que se indica el tipo de escenario con el que se ejecutará la simulación.
- *Dimensionado\_previo*: Indica si la simulación opera en el modo con o sin dimensionado.

```
[General]
network=simuladorRedElastica.src.Redes.RedPruebas_NSFNET
cmdenv-event-banners = false
cmdenv-express-mode = true
cmdenv-module-messages = false
cmdenv-performance-display = false
cmdenv-status-frequency = 60s
rng-class="cMersenneTwister"
num-rngs = 1024

...

**.dynamic_type_transmitter = {"heterogeneous"}
**.dynamic_TG_algorithm = {"MinTHP_SR"}
**.dynamic_TG_algorithm_64QAM = {"Load_Balancing_SR"}
**.dynamic_load = {"1400/182"}

...

**.dimensionado_previo = false
```

Figura 28. Ejemplo de fichero de dimensionado

### 3. Estructuras de datos y tablas más relevantes

Las estructuras de datos, junto con sus correspondientes tablas, que se utilizarán a lo largo del cálculo del opex son las siguientes:

- **Conexión eléctrica**

Esta estructura representa las conexiones eléctricas que se establecen y liberan en la red. Cabe mencionar que una conexión puede ir por varios *lightpaths*, y que un *lightpath* puede multiplexar varias conexiones eléctricas.

```

struct electrical_LSP{
    int id_conexion;
    int id_lp_original;
    int slot_inicio;
    int slots_ocupados;
    int tamano_peticion;
    int origen;
    int destino;
    int_vector_t ruta;
};

```

Profundizando en los parámetros:

- **Identificador de la conexión:** Es único y se utilizará para distinguir las diferentes conexiones.
- **Identificador del *lightpath*:** Se almacena el identificador del *lightpath* en el que se ha multiplexado la conexión.
- **Slot inicio y slots ocupados:** Definen la asignación de espectro.
- **Tamaño de petición:** Define el tamaño de la petición de la conexión.
- **Origen y destino:** Definen los nodos donde comienza y finaliza la conexión.
- **Ruta:** Especifica las fibras que recorrerá la conexión eléctrica desde el origen al destino.

Respecto a la tabla “*tabla\_electrical\_LSPs*” que usa la anterior estructura de datos, contiene la información de las conexiones eléctricas actuales, de manera que se tendrá que actualizar continuamente.

Las dos primeras dimensiones de la tabla corresponden con el origen, el destino, y la tercera, se establece por el hecho de que entre un mismo origen y destino puede haber más de una conexión eléctrica establecida al mismo tiempo:

```

tabla_electrical_LSP[origen][destino][i]

```

De manera auxiliar se ha utilizado otra estructura para hacer los cálculos relacionados con las conexiones que utilizan varios *lightpaths*:

```

struct conexion{
    int id_conexion;
    int slots_conexion;
    int_vector_t lightpaths;
};

```

Profundizando en los parámetros:

- **Identificador de la conexión:** Es único y se utilizará para distinguir las diferentes conexiones.

- **Slots de la conexión:** Definen la asignación de espectro.
- **Lightpaths:** Especifica los *lightpaths* en los que se ha multiplexado la conexión eléctrica desde el origen al destino.

- **Lightpaths**

Esta estructura representa los *lightpaths* establecidos en la red por los que se multiplexan las conexiones eléctricas.

```
struct lightpath{
    int id_lp;
    int slot_inicio;
    int slots_ocupados;
    int slots_reservados;
    int origen;
    int destino;
    simtime_t tiempo_establecimiento;
    int_vector_t ruta;
    int_vector_t conexiones;
};
```

Profundizando en los parámetros:

- **Identificador del *lightpath*:** Es único y se utilizará para distinguir los diferentes *lightpaths*.
- **Slot inicio, slots reservados y slots ocupados:** Definen la asignación de espectro.
- **Origen y destino:** Definen los nodos donde comienza y finaliza el *lightpath*.
- **Tiempo establecimiento:** Almacena el tiempo de establecimiento del *lightpath*.
- **Ruta:** Especifica el camino que se recorrerá desde el origen al destino.
- **Conexiones:** Como se mencionó anteriormente por un mismo *lightpath* pueden multiplexarse varias conexiones, es por ese motivo por el cual se establece este vector.

Respecto a la tabla "*tabla\_lightpaths*" es unidimensional, y se utiliza para almacenar los *lightpaths* establecidos actualmente en la red.



- **Enlaces, fibras y fibras activas**

Las estructuras que se analizarán a continuación sirven para saber el estado de los enlaces en la red.

Lo primero que hay que tener en cuenta es que debido a que los enlaces son bidireccionales, entonces cada enlace está formado por dos fibras unidireccionales. Siendo el número total de enlaces 21, el número de fibras será justo el doble, es decir, 42.

- La estructura de datos correspondiente a los enlaces define las características principales de los enlaces.

```
struct enlace{
    int id_nodo_a;
    int id_nodo_b;
    int numero_amplificadores;
    int longitud;
    int_vector_t fibras;
};
```

Profundizando en los parámetros:

- **Identificador del nodo a y del nodo b:** Dicen cual son los nodos de origen y destino.
  - **Número amplificadores:** Establece el número de amplificadores por enlace.
  - **Longitud:** Indica la longitud del enlace. Este dato es útil si como mejoras futuras se quiere adaptar el número de amplificadores por enlace dependiendo del tamaño del enlace.
  - **Fibras:** Especifica las fibras que constituyen cada enlace.
- La estructura de datos correspondiente a las fibras especifica las fibras que existen en la red.

```
struct fibra{
    int id_modulo_origen;
    int id_modulo_destino;
    int id_puerta_origen;
};
```

Profundizando en los parámetros:

- **Identificadores del módulo origen, destino y de la puerta origen:** Dicen cual son los nodos de origen, destino y de la puerta de origen.

Las estructuras de datos tanto la de fibras como la de enlaces combinadas dicen que fibras pertenecen a qué enlaces.

- La estructura de datos de las fibras activas es realmente importante de cara al cálculo del coste de los amplificadores.

```
struct fibras_activas{
    int id_nodo_origen;
    int id_nodo_destino;
    int num_lps;
    int activacion;
};
```

Profundizando en los parámetros:

- **Identificador del nodo origen y del nodo destino:** Dicen cual son los nodos de origen y destino.
- **Activación:** Hace referencia a si la fibra está activa o no.

Las tablas “*tabla\_enlaces*”, “*tabla\_fibras*” y “*tabla\_fibras\_activas*” sirven para almacenar el estado de los enlaces y de las fibras a lo largo de la simulación.

#### 4. Función “*calculo\_opex*”

La función implementa los cálculos del modelo de costes expuestos a lo largo del trabajo.

Es por ello que se llamará a la función cada vez que los costes sufran alguna modificación, y esto solo sucederá cada vez que se establezca o libere una conexión, ya que será entonces cuando los cálculos se incrementen o decrementsen respectivamente.

Para entender mejor estas modificaciones en el opex, es interesante ver los cambios producidos por el establecimiento de las conexiones:

- Si las conexiones se establecen en nuevos *lightpaths*, cada uno de ellos necesitará el funcionamiento de dos nodos IP/MPLS (uno de origen y otro de destino), y de todos los nodos OXC por los que atraviese la conexión incluyendo los de origen y destino. Además entrarán en funcionamiento las partes específicas de los transpondedores correspondientes por *lightpath*, así como los EDFAs de las fibras por las que atraviese (en caso de que aún no estuvieran activos).

El resultado a nivel de opex se verá incrementado tanto a nivel de coste por consumo de potencia como por el coste por reparación y sustitución, este último debido al incremento de dispositivos activos.

- Si las conexiones se establecen en *lightpaths* que ya existían, los nodos IP/MPLS y OXC así como los amplificadores y transpondedores que atraviesan ya deberían estar funcionando.

El resultado a nivel de opex se verá afectado por el coste por consumo de potencia.

- Si las conexiones se establecen en *lighpaths* nuevos y ya establecidos, entraran en funcionamiento aquellos nodos IP/MPLS, OXC, amplificadores y transpondedores que correspondan al nuevo *lightpath*.

A nivel de opex se verá afectado por el coste por consumo de potencia y el de reparación y sustitución.

### Amplificadores

El cálculo del opex de los amplificadores se basará en el uso de las tablas formadas con las estructuras de datos de enlace, fibra y fibras activas.

Respecto al coste por consumo de potencia y el coste por reparación y sustitución, gracias a las tablas de fibras y fibras activas, se puede saber qué fibras transmiten tráfico y de esta manera se puede saber qué amplificadores y EDFAs están activos para así realizar los cálculos pertinentes.

### Transpondedores

El coste de los transpondedores se apoyará en el uso de la tabla de *lighpaths*.

Debido a que el cálculo del coste por consumo de potencia dependerá del estado de la red en cada momento, en concreto de las subportadoras establecidas en cada *lightpath*, la potencia se incrementará o decrementará conforme se establecen o liberan los *lighpaths*.

Respecto al coste por reparación y sustitución, basta con saber el número de *lighpaths* mediante la tabla mencionada, para saber el número de transpondedores activos.

### Nodos OXC

Para hallar los costes relativos a este tipo de nodos se hace necesario saber las fibras unidireccionales con las que está conectado cada nodo y el grado lógico del mismo.

El cálculo de ambos parámetros se podrá realizar de la combinación de las tablas de fibras (que da la relación entre las fibras y los nodos), y de la tabla *lighpaths* (que dice que fibras atraviesa cada *lightpath*).

El coste por consumo de potencia y el coste por reparación-sustitución dependerán de los parámetros mencionados y de su aplicación en las fórmulas del modelo de costes.

### Nodos IP/MPLS

El cálculo del coste para este tipo de nodos, depende de los nodos activos en los que inicia o termina un *lightpath*.

Estos nodos se pueden sacar de la combinación de la tabla de *lighpaths* (que dirá qué fibras atraviesa el *lightpath*) y la tabla de fibras activas (ya que dirá los nodos de origen y destino de estas fibras).

Para obtener el coste por consumo de potencia, así como el coste por reparación y sustitución basta con combinar las fórmulas del modelo con los parámetros calculados previamente.

## 5. Función “*calculo\_capex*”

De igual manera que en el caso anterior, esta función implementa los cálculos del modelo de costes del trabajo.

Dado que para el cálculo del capex se hace necesario saber el número máximo de recursos, y dado que el simulador puede operar de dos maneras distintas, entonces dependiendo del funcionamiento se utilizará:

- Una tabla ‘*tabla\_alquiler*’ en el que se almacene, a lo largo de la simulación, el máximo número de recursos por nodo, en caso de que el simulador opere sin dimensionado previo.
- Un fichero inicial en el que están almacenados los recursos, en caso de que el simulador opere con dimensionado previo.

Con los valores obtenidos y las ecuaciones mostradas en el Capítulo IV se pueden calcular los costes necesarios.

En este caso se llamará a la función al final de la simulación, ya que será entonces cuando se hayan calculado los máximos recursos necesarios que utilizar a lo largo de la simulación (en el caso sin dimensionado previo).

## 6. Función “*calculo\_opex\_alquiler*”

Para realizar el cálculo del coste por alquiler y mantenimiento se hará necesaria la creación de una tabla “*tabla\_alquiler*” a lo largo de la función *calculo\_opex()*, que almacene el número máximo de:

- Puertos IP.
- WSS activos en la red.
- Transpondedores.

Hay que tener en cuenta que estos parámetros se almacenan para cada nodo y que aunque se liberen las conexiones y disminuyan los parámetros se almacenará el valor máximo.

### Transpondedores

En relación al coste por alquiler y mantenimiento, será necesario saber el número de *slots* de los transpondedores, lo cual se puede obtener mediante el número máximo de transpondedores activos por nodo.

$$slots_{transpondedores_{nodo}} = \text{número máximo transpondedores activos}_{nodo} \quad (3.1)$$

## Nodos OXCs

Respecto al equipamiento OXC será necesario el cálculo del número máximo de WSS por nodo para calcular el número de *slots*.

$$slots_{equipamiento\ OXC_{nodo}} = \text{número máximo WSS activos}_{nodo} \cdot 2 \quad (3.2)$$

## Nodos IPs

Finalmente en relación al equipamiento IP se calculará sabiendo el tráfico máximo IP por nodo, ya que gracias a dicho valor se podrán obtener los puertos activos y con ello los *slots* necesarios.

$$puertos\ activos_{equipo\ IP_{nodo}} = \left\lceil \frac{\text{tráfico IP máximo}_{nodo}}{40} \right\rceil \quad (3.3)$$

$$slots_{equipamiento\ IP_{nodo}} = puertos\ activos_{equipamiento\ IP_{nodo}} \quad (3.4)$$

## 7. Función “*calcula\_media\_ponderada*”

La finalidad de estudio tecno-económico es ver la evolución del opex y el capex respecto a la carga de la red en relación a su compromiso con la tasa de bloqueo de ancho de banda (BBR).

Es por ello que se almacenará a lo largo de la simulación el valor del opex, para finalmente calcular la media. Esta media se calcula mediante la clase ‘*análisis*’ (ficheros analisis.h y analisis.cc), la cual implementa el método propuesto por Law y Carson para obtener el valor promedio de un parámetro en una simulación en la que se está interesado en el estado estacionario.

El problema reside en que el almacenamiento del opex no se realiza de manera periódica, sino cuando se establecen y liberan las conexiones, (lo cual no sucede de manera constante) y la clase ‘*análisis*’ realiza una media sin ponderar.

Para realizar dicho cometido se ha creado una función que se programará en intervalos periódicos para poder realizar la media ponderada. Durante este intervalo cuando se establezcan y liberen las conexiones y cuando finalice el intervalo, se almacenarán en un vector el opex, así como en otro vector los instantes de tiempo en los que se realizan dichos cálculos.

Con los vectores de opex y tiempo, la función implementa las siguientes fórmulas para ponderar el opex:

$$opex\ acumulado = \sum (tiempo_i - tiempo_{i-1}) \cdot opex_i \quad (3.5)$$

$$opex\ ponderado = \frac{opex\ acumulado}{intervalo\ de\ tiempo} \quad (3.6)$$

Una vez obtenido el valor, se limpiarán los contenidos de los vectores ‘*opex*’ y ‘*tiempo*’ y se inicializará el intervalo de nuevo.

Estos valores calculados son los que se almacenarán mediante la clase '*análisis*' y sobre los cuales se calculará la media final con la que se obtendrá el opex definitivo.

## **8. Portabilidad de las funciones**

Las funciones implementadas tienen la ventaja de que si se realizan futuros cambios en el coste, algo muy común debido a que la tecnología avanzada a grandes pasos se pueden adaptar mediante pequeñas modificaciones en el código, en su mayor parte numéricas.

## Bibliografía

---

- [1] Jesús Javier Castro Bravo, “Traffic Grooming en redes ópticas flexibles: Desarrollo de un simulador y estudio de sus prestaciones”, Proyecto Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad de Valladolid, Julio 2014.
- [2] Recommendation ITU-T G.694.1, “Spectral grids for WDM applications: DWDM Frequency grid”. February 2012.
- [3] S. Zhang, C. Martel, B. Mukherjee, “Dynamic traffic Grooming in Elastic Optical Networks”, *IEEE Journal on selected areas in communications*, Vol. 31, No. 1, pp. 4-12, January 2013.
- [4] Ori Gerstel, Masahiko Jinno, Andrew Lord, S. J. Ben Yoo, “Elastic Optical Networking: A New Dawn for the Optical Layer?”, *IEEE Communications Magazine*, February 2012.
- [5] I. Tomkos, J. Solé-Pareta, E. Palkopoulou, D. Careglio, “A Tutorial on the Flexible Optical Networking Paradigm: State of the Art, Trends, and Research Challenges”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 102, No. 9, September 2014.
- [6] Proyecto europeo CHRON. Entregable 2.4, “Techno-economic evaluation of the CHRON architecture”. Disponible en <http://www.ict-chron.eu/Downloads/>, February 2013.
- [7] Jorge López Vizcaíno, Yabin Ye, Víctor López, Felipe Jiménez, Raúl Duque, Peter M. Krummrich, “Cost Evaluation for Flexible-Grid Optical Networks”, *IEEE Globecom Workshops (GC'12)*, (Anaheim, Estados Unidos), pp. 358-363, December 2012.
- [8] J.López, Y.Ye, V. López, F. Jiménez, R. Duque, y P.Krummrich, “On the energy efficiency of survivable optical transport networks with flexible-grid”, *European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC'12)*, (Amsterdam, Holanda), pp.5.05, September 2012.
- [9] O. Pedrola, A. Castro, L. Velasco, M. Ruiz, J. P. Fernández-Palacios, and D. Careglio, “CAPEX Study for a Multilayer IP/MPLS-Over-Flexgrid Optical Network”, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, Vol. 4, No. 8, pp.639-650, September 2012.
- [10] A. Bocoï, et al., "Cost Comparison of Networks Using Traditional 10 and 40 Gb/s Transponders Versus OFDM Transponders", *OFC/NFOEC 2008*, Paper OThB4, Feb. 2008.
- [11] M. de Groote, K. Manousakis, P. Kokkinos, D. Colle, M. Pickavet, K. Chritodouloupoulos, E. Varvarigos, y P. Demeester, “Cost comparison of different translucent optical network architectures”, *9<sup>th</sup> Conference on*

- Telecommunications Internet and Media Techno Economics (CTE'10)*, (Gante, Bélgica), pp. 1-8, June 2010.
- [12] S.Verbrugge, D. Colle, P. Demeester, R. Huelsermann, M. Jaeger, “General availability model for multilayer transport networks”, *Proceedings 5th International Workshop on Design of Reliable Communication Networks, (DRCN'05)*, (Isquia, Italia), October 2005.
- [13] R. Huelsermann, M. Gunkel, C. Meusburger, and D. A. Schupke, “Cost modeling and evaluation of capital expenditures in optical multilayer networks,” *J. Opt. Netw.*, vol. 7, no. 9, pp. 814–833, 2008.
- [14] W. Van Heddeghem, F. Idzikowski, W. Vereecken, D. Colle, M. Pickavet, y P. Demeester, “Power consumption modeling in optical multilayer networks”, *Photonic Network Communications*, vol. 24, no 2, pp. 86-102, October 2012.
- [15] Europe’s energy portal, <http://www.energy.eu/>, retrieved in 2012 (for Spain).
- [16] Página web del entorno de simulación OMNeT++, <http://www.omnetpp.org/>
- [17] Página web de la librería de grafos LEMON, <http://lemon.cs.elte.hu/trac/lemon>
- [18] J.J. Castro, S. Fernández, I. de Miguel, R.J. Durán, N. Fernández, N. Merayo, J.C. Aguado, P. Fernández, R.M. Lorenzo, E.J. Abril, "A Comparison of Dynamic Traffic Grooming Algorithms for Elastic Optical Networks", *Proceedings ICTON 2015*, Paper Tu.B3.1, Budapest (Hungría), 5-9 de Julio de 2015, Ponencia invitada.
- [19] Sara Fernández Atienza, “*Simulación y optimización de redes ópticas elásticas: Estudio tecno-económico.*”, Trabajo Fin de Grado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad de Valladolid, Enero 2015.