



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN



## TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE  
TELECOMUNICACIÓN

### **Simulación y optimización de redes ópticas elásticas: Estudio tecno-económico.**

**AUTOR:** SARA FERNÁNDEZ ATIENZA.

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

VALLADOLID, ENERO DE 2015



## **TRABAJO FIN DE GRADO**

---

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

---

## **TRIBUNAL**

---

**PRESIDENTE:** Ignacio de Miguel Jiménez  
**VOCAL:** Ramón J. Durán Barroso  
**SECRETARIO:** Noemí Merayo Álvarez  
**SUPLENTE:** Juan Carlos Aguado Manzano  
**SUPLENTE:** Rubén M. Lorenzo Toledo

---



## Resumen de TFG

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 varios formatos de modulación en una misma conexión.

Debido a la implementación de este tipo de redes ópticas se hace necesaria la sustitución de los equipos utilizados en las redes convencionales por otros que soporten dicha elasticidad. Es en este punto en el que adquiere sentido el estudio de los costes en las redes ópticas elásticas.

El modelo de costes planteado se divide en una parte de implementación del equipamiento, capex, y otra parte operacional, opex. La primera parte se mantiene constante a lo largo del tiempo (salvo cuando se producen actualizaciones de la infraestructura de la red) ya que independientemente de si los equipos están activos o no, sí que están ahí. La segunda parte se desglosa en el estudio de la potencia consumida por los equipos (la cual se traduce en un coste), el coste por alquiler, y el coste por mantenimiento y reparación.

Las aportaciones del proyecto consisten en la extensión de un entorno de simulación de manera que se estudie el coste tecno-económico de las redes ópticas elásticas, al emplear distintos algoritmos y formatos de modulación para provisionar peticiones de conexión recibidas dinámicamente.

## 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 different modulation types in the same connection.

Due to the implementation of this type of optical networks, it becomes necessary the replacement of the equipment used in conventional networks by others which support this elasticity. In this context, it is especially important to carry out a study about costs in elastic optical networks.

It has been proposed a cost model divided into an equipment implementation part, capex, and an operational part, opex. The first part doesn't vary along time (unless there are updates in the network equipment) since equipment is always in the network, regardless of whether it is working. The second part contains a study of the power consumption in the equipment (expressed as a cost), the lease cost and the cost of repair and maintenance.

The contributions of this work consist of the extension of a simulation environment, so that the techno-economical cost of the elastic optical networks can be studied, employing different algorithms and modulation types for provision connection requests received dynamically.

## **Keywords**

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



## **Agradecimientos**

En primer lugar quería agradecer a Ignacio de Miguel Jiménez por su constancia, tenacidad y apoyo durante todo el transcurso del proyecto. Sin su confianza, ayuda y paciencia no hubiera sido posible el desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado.

No me quiero olvidar de 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.

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).

A todos, muchas gracias.



*El verdadero progreso es el  
que pone la tecnología al  
alcance de todos.*

*Henry Ford*



# Índice

---

## Contenido

Índice de figuras .....	15
Índice de tablas .....	17
Introducción.....	21
<b>Capítulo I. 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 flexibles.....	27
5. Análisis de capex y opex.....	28
<b>Capítulo II. Estudio del coste tecno-económico en redes elásticas .....</b>	<b>29</b>
1. Costes de Capital (capex).....	29
2. Costes debido al uso y funcionamiento de la red (opex) .....	33
3. Ejemplo de estudio.....	39
<b>Capítulo III. Contexto del estudio de simulación.....</b>	<b>47</b>
1. Topología de la red de simulación.....	47
2. <i>Algoritmo utilizado</i> .....	47
3. Políticas de <i>traffic grooming</i> .....	50
4. Esquema de reserva de espectro ( <i>SR, Spectrum Reservation Scheme</i> ).....	51
5. Modelo de costes .....	52
<b>Capítulo IV. Modelo de costes aplicado al entorno de simulación .....</b>	<b>55</b>
1. Aspectos previos a tener en cuenta.....	55
2. Entorno de simulación con un solo formato de modulación .....	56
3. Entorno de simulación con varios formatos de modulación .....	69

<b>Capítulo V. Estudio tecno-económico de una red con un solo formato de modulación</b> .....	79
1. Aspectos previos.....	79
2. Estudio del impacto de las simulaciones sin limitación de distancia .....	79
3. Estudio del impacto de las simulaciones con limitación de distancia .....	86
<b>Capítulo VI. Conclusiones y líneas futuras de trabajo</b> .....	89
<b>Anexo. Desarrollo del simulador en OMNeT++</b> .....	91
1. Funcionamiento del simulador basado en OMNET++ .....	91
2. Estructuras de datos y tablas más relevantes.....	93
3. Función “ <i>calculo_opex</i> ” .....	96
4. Función “ <i>calculo_opex_alquiler</i> ” .....	98
5. Función “ <i>calculo_media_ponderada</i> ” .....	98
6. Portabilidad de las funciones.....	99
<b>Bibliografía</b> .....	101

## 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 <i>lightpath</i> entre el nodo origen y destino. ....	28
<b>Figura 3.</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. ....	33
<b>Figura 4.</b> Ejemplo del establecimiento de una conexión que atraviesa dos <i>lightpaths</i> diferentes. ....	39
<b>Figura 5.</b> Ejemplo de una conexión que va por un <i>lightpath</i> y cuyas subportadoras no tienen el mismo formato de modulación. ....	42
<b>Figura 6.</b> Red de simulación para el estudio del capex y opex. ....	47
<b>Figura 7.</b> Algoritmo para resolver el encaminamiento de las conexiones. [3] ....	50
<b>Figura 8.</b> Diferencias entre <i>lightpaths</i> establecidos sin reservar espectro (a) y con reserva de espectro (b). ....	52
<b>Figura 9.</b> Capacidad máxima de un <i>lightpath</i> y de los slots que contiene . ....	52
<b>Figura 10.</b> Establecimiento de la primera conexión en una red elástica óptica elástica con un solo formato de modulación. ....	56
<b>Figura 11.</b> Establecimiento la segunda conexión en una red elástica óptica elástica con un solo formato de modulación. ....	60
<b>Figura 12.</b> Establecimiento de todas las conexiones hasta la séptima. ....	64
<b>Figura 13.</b> Establecimiento de la primera conexión en una red elástica óptica elástica con varios formatos de modulación. ....	70
<b>Figura 14.</b> Establecimiento de la segunda conexión en una red elástica óptica elástica con varios formatos de modulación. ....	70
<b>Figura 15.</b> Establecimiento de la tercera conexión en una red elástica óptica elástica con varios formatos de modulación. ....	74
<b>Figura 16.</b> Número medio de transpondedores activos al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK suponiendo un medio físico ideal. ....	80

<b>Figura 17.</b> Tasa de bloqueo de ancho de banda (BBR) al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK suponiendo un medio físico ideal.....	81
<b>Figura 18.</b> Número medio de saltos en la topología física al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK suponiendo un medio físico ideal.....	82
<b>Figura 19.</b> Número de saltos en la topología virtual al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK suponiendo un medio físico ideal.....	83
<b>Figura 20.</b> Número de puertos activos IP al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK suponiendo un medio físico ideal.....	83
<b>Figura 21.</b> Número de WSSs totales activos IP al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK suponiendo un medio físico ideal.....	84
<b>Figura 22.</b> Opex total al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK suponiendo un medio físico ideal. Valor por puerto IP = 11,2284.....	85
<b>Figura 23.</b> Opex total al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK suponiendo un medio físico ideal. Valor por puerto IP = 0,4491.....	86
<b>Figura 24.</b> Número medio de transpondedores activos al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico suponiendo modulación QPSK y un medio físico real.....	87
<b>Figura 25.</b> Tasa de bloqueo de ancho de banda (BBR) al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico suponiendo modulación QPSK y un medio físico real.....	87
<b>Figura 26.</b> Número medio de saltos en la topología física al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico suponiendo modulación QPSK y un medio físico real.....	87
<b>Figura 27.</b> Número de saltos en la topología virtual al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK, suponiendo un medio físico real.....	88
<b>Figura 28.</b> Opex total al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK, suponiendo un medio físico real. Valor por puerto IP = 11,2284.....	88
<b>Figura 29.</b> Opex total al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK, suponiendo un medio físico real. Valor por puerto IP = 0,4491.....	88
<b>Figura 30.</b> Resumen del intercambio de mensajes entre módulos.....	91

## Índice de tablas

---

### Contenido

<b>Tabla 1.</b> Valores de capacidad (Gb/s), coste (u.c) y alcance máximo transparente (km), respecto el formato de modulación. ....	29
<b>Tabla 2.</b> Valores de coste (u.c) por amplificador.....	30
<b>Tabla 3.</b> Valores de coste (u.c) por WSS. ....	31
<b>Tabla 4.</b> Valores de capacidad (Gb/s) y coste (u.c) respecto el máximo número de puertos por equipamiento IP.....	32
<b>Tabla 5.</b> Valores de capacidad (Gb/s) y potencia (W) de los transpondedores, respecto el formato de modulación.....	34
<b>Tabla 6.</b> Coste de reparación (u.c) por fallo en equipamiento.....	36
<b>Tabla 7.</b> MTBF(h) optimista, nominal y conservativo, por fallo para los distintos equipos de red.....	37
<b>Tabla 8.</b> Coste de alquiler por metro cuadrado por año . ....	37
<b>Tabla 9.</b> Slots para los distintos equipos de red.....	38
<b>Tabla 10.</b> Análisis del número de metros cuadrados por slots, por shelves y por racks.....	38
<b>Tabla 11.</b> Número de equipos OXC, IP/MPLS y transpondedores en el ejemplo de estudio. ....	45
<b>Tabla 12.</b> Características principales de la primera conexión establecida en el entorno de simulación.....	56
<b>Tabla 13.</b> Características principales de la segunda conexión establecida en el entorno de simulación.....	60
<b>Tabla 14.</b> Nodos y <i>lightpaths</i> que atraviesan y multiplexan las siete primeras conexiones establecidas en la simulación. ....	64
<b>Tabla 15.</b> Tráfico gestionado por las siete primeras conexiones. ....	64
<b>Tabla 16.</b> Tráfico IP, número de WSS activos y transpondedores máximos por nodo. ....	67
<b>Tabla 17.</b> Número de WSS y slots máximos por nodo. ....	67
<b>Tabla 18.</b> Tráfico IP máximo, puertos activos y slots por equipamiento IP por nodo... ..	68
<b>Tabla 19.</b> Coste por alquiler para los nodos de la red óptica elástica simulada. ....	69

**Tabla 20.** Número de slots de los diferentes formatos de modulación para los distintos tamaños de conexión. .... 69

**Tabla 21.** Características principales de la primera conexión establecida en el entorno de simulación. .... 69

**Tabla 22.** Características principales de la segunda conexión establecida en el entorno de simulación. .... 71

**Tabla 23.** Características principales de la segunda conexión establecida en el entorno de simulación. .... 74

## Índice de ecuaciones

---

### Contenido

<b>Ecuación 1.1.</b> Capex total de los transpondedores.....	30
<b>Ecuación 1.2.</b> Capex por equipo transpondedor .....	30
<b>Ecuación 1.3.</b> Capex total de los amplificadores .....	30
<b>Ecuación 1.4.</b> Capex por equipo amplificador .....	30
<b>Ecuación 1.5.</b> Número de WSSs .....	31
<b>Ecuación 1.6.</b> Grado lógico entrante y saliente .....	31
<b>Ecuación 1.7.</b> Capex total de los OXCs .....	31
<b>Ecuación 1.8.</b> Capex por nodo OXC .....	31
<b>Ecuación 1.9.</b> Capex total de los nodos IP/MPLS .....	32
<b>Ecuación 1.10.</b> Aproximación de los costes por nodos IP/MPLS mediante regresión lineal (primer modelo) .....	32
<b>Ecuación 1.11</b> Aproximación de los costes por nodos IP/MPLS mediante regresión lineal (primer modelo) .....	32
<b>Ecuación 1.12.</b> Capex total .....	33
<b>Ecuación 2.1.</b> Potencia total de los transpondedores .....	34
<b>Ecuación 2.2.</b> Potencia por equipo transpondedor .....	34
<b>Ecuación 2.3.</b> Potencia total de los amplificadores .....	35
<b>Ecuación 2.4.</b> Potencia por equipo amplificador .....	35
<b>Ecuación 2.5.</b> Potencia total de los WSSs .....	35
<b>Ecuación 2.6.</b> Potencia por equipo WSS .....	35
<b>Ecuación 2.7</b> Potencia total de los nodos IP/MPLS .....	35
<b>Ecuación 2.8.</b> Potencia por nodo IP/MPLS .....	36
<b>Ecuación 2.9.</b> Potencia total .....	36
<b>Ecuación 2.10.</b> Opex por consumo de potencia .....	36
<b>Ecuación 2.11.</b> Opex por reparación de cada equipo .....	36

<b>Ecuación 2.12.</b> Opex por reparación de cada tipo de equipo .....	36
<b>Ecuación 2.13.</b> Opex totales por reparación .....	37
<b>Ecuación 2.14.</b> Slots totales .....	38
<b>Ecuación 2.15.</b> Número de shelves .....	38
<b>Ecuación 2.16.</b> Número de racks .....	38
<b>Ecuación 2.17.</b> Metros cuadrados por rack .....	38
<b>Ecuación 2.18.</b> Opex por nodo de alquiler y mantenimiento .....	38
<b>Ecuación 2.19.</b> Opex total de alquiler y mantenimiento .....	38
<b>Ecuación 2.20.</b> Opex total .....	39
<b>Ecuación 3.1.</b> Slots máximos por nodo por equipo transpondedor .....	98
<b>Ecuación 3.2.</b> Slots máximos por nodo por equipo OXC .....	98
<b>Ecuación 3.3.</b> Puertos IP activos máximos por nodo .....	98
<b>Ecuación 3.4.</b> Slots máximos por nodo por equipo IP .....	98
<b>Ecuación 3.5.</b> Opex acumulado .....	100
<b>Ecuación 3.6.</b> Opex ponderado .....	100

---

# Capítulo I

---

## Introducción

---

### 1. Motivación y objetivos

Las redes ópticas están experimentando cambios significativos impulsados por el crecimiento exponencial de tráfico debido a los servicios multimedia y por el aumento de las fuentes de tráfico debido a los modelos cambiantes de contenidos a través de Internet [1].

Hasta el momento el modelo más extendido y estandarizado eran las redes WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), dichas redes se caracterizaban por la multiplexación por división de longitud de onda con división del espectro en una rejilla espectral fija establecida por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-T) [2]. Dichas redes ofrecen la posibilidad de establecer conexiones a una tasa de bits fija tales como 10, 40 Gb/s y actualmente 100Gb/s, y un formato de modulación de los canales fijo [3][4][5].

Aun con las mejoras realizadas en las redes ópticas (se están planteando tasas de 400 Gb/s y 1Tb/s para un futuro muy cercano), en muchas ocasiones la respuesta a la demanda es insuficiente, ya que esta tecnología de transmisión restringe la capacidad de la red y la posibilidad de aumentar la transmisión de las conexiones a largas distancia. Además como inconveniente adicional cabe mencionar la creciente concienciación de que el ancho de banda se está acercando a su límite.

Es por ello que debido a la incapacidad necesaria de adaptación en los entornos actuales de este tipo de redes se vuelve necesario mejorar la eficiencia en las condiciones planteadas y por tanto es en este punto, en el que aparece como solución las redes elásticas.

Los recientes avances en división de frecuencia ortogonal multiplexación óptica coherente (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [5], Nyquist WDM (N-WDM), y la generación de forma de onda arbitraria óptica (OAWG, *Optical Arbitrary Waveform Generation*) han generado las bases para imaginar las redes ópticas totalmente flexibles.

Las redes ópticas elásticas se basan en la tecnología *flexgrid* que permite el empleo de subportadoras de tamaño fijo, dando lugar a anchos de banda variables, así como a gran flexibilidad respecto a los formatos de modulación.

Es en este punto en el que se hace necesaria la decisión entre las distintas políticas de asignación de espectro y formatos de modulación para las distintas subportadoras, ya que dará lugar a distintos resultados tanto de rendimientos como de costes de operación.

En esta decisión, la finalidad de este Trabajo Fin de Grado es extender un simulador de redes ópticas elásticas para analizar y comparar los distintos resultados obtenidos al aplicar distintas políticas de *traffic grooming* dinámico, de manera que se pueda comparar sus prestaciones en términos de ancho de banda, número de transpondedores y costes de implementación, capex, y operación, opex.

La topología de red considerada en este proyecto es la red NSFNet, aunque se podría aplicar cualquier otro tipo de red, ya que el simulador está implementado de manera que se pueda aplicar a cualquier tipo de redes, y con facilidad para hacer los cambios necesarios para ajustar a las características de las redes desarrolladas en la actualidad con sus correspondientes avances.

El estudio tecno-económico que se desarrollará a continuación es de gran interés en el sector de las telecomunicaciones ya que la tecnología está en constante cambio y es una necesidad primordial satisfacer las necesidades de unos usuarios cada vez más exigentes.

Los objetivos principales del proyecto son:

- ✓ Plantear las características principales de las redes ópticas elásticas, abarcando el concepto de *traffic grooming*, visto en [1][3].
- ✓ Analizar el modelo de costes de las redes ópticas elásticas, de manera que se explicará cómo analizar el coste de una red, desde los costes por su implementación hasta los costes por uso, lo que incluye reparación, mantenimiento, sustitución, alquiler y costes por potencia.
- ✓ Extender un simulador de redes ópticas elásticas desarrollado previamente en el entorno de simulación OMNeT++ para introducir el modelo de costes.
- ✓ Simular diferentes políticas de *traffic grooming* dinámico para ver su impacto en los costes asociados.

Con todo ello, el presente documento no sólo cubre el concepto de costes en las redes ópticas elásticas sino que le da al lector una idea de cómo poder elegir cual son las políticas idóneas en cada tipo de redes, haciendo más sencilla su elección.

## 2. Organización de la memoria

La memoria está organizada de la siguiente manera:

El capítulo 2 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].

El capítulo 3 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 capítulo 4 realiza una primera aproximación a la red y al simulador que se van a utilizar para el caso de estudio, abarcando la topología de la red a analizar, los algoritmos implementados en dicho simulador (es decir, las políticas de *traffic grooming*) [1][3] y el modelo de costes[6].

En el capítulo 5 se estudia un primer cálculo de los costes de opex para el contexto implementado en el capítulo anterior.

Además en el capítulo 6 se analizan los resultados obtenidos mediante simulación, realizando la comparativa entre los costes obtenidos y otros parámetros de los que depende la red, como el número medio de transpondedores, el número máximo de puertos IP y de WSSs, carga de la red, tasa de bloqueo del ancho de banda y número medio de saltos en la topología física y virtual por conexión eléctrica.

El capítulo 7 muestra las conclusiones del trabajo fin de grado, así como futuras líneas de investigación que son interesantes de cara a la mejora del estudio de costes y la implementación de un simulador que seleccione las mejores características entre las referentes a la implementación y el modelo de costes.

Finalmente el anexo presenta la implementación de la parte tecno-económica del simulador desarrollado con OMNeT++.



## Capítulo II

# Fundamentos de Redes Ópticas Elásticas

---

### 1. Definición de redes ópticas elásticas

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 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 velocidad de bits y la distancia de transmisión.

Para conseguir este objetivo se han 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.

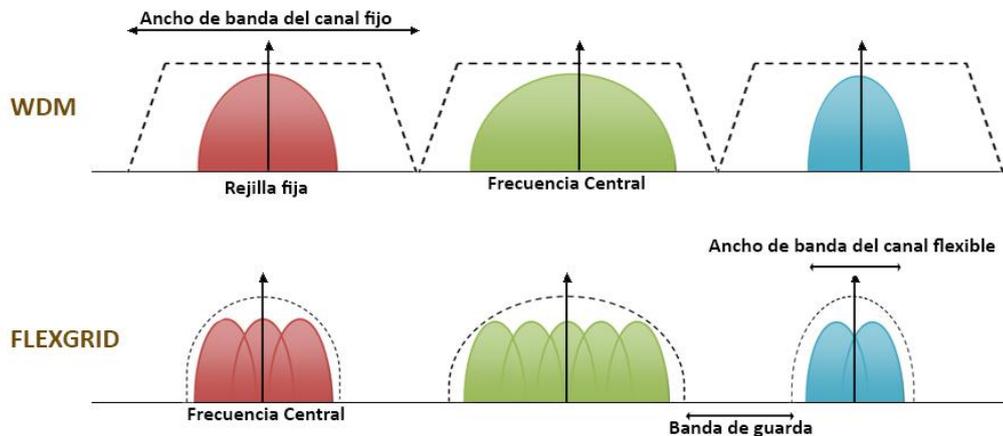


Figura 1. Diferencia entre la asignación de espectro mediante WDM y FLEXGRID. En la tecnología WDM el ancho de banda es fijo, mientras que en la tecnología FLEXGRID se utilizan subportadoras de tamaño fijo que se solapan de manera que el ancho de banda total es variable.

- **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 transpondedores elásticos que soporten este tipo de redes. Las características más importantes que ofrecen este tipo de equipos son los diferentes grados de flexibilidad con respecto al formato de modulación, la

velocidad de símbolo, la relación de la FEC (*Forward Error Correction* o corrección de errores hacia adelante) sobre la carga útil, el número y espaciado de las subportadoras que componen un supercanal, así como la separación entre canales. Para entender mejor el compromiso entre estos conceptos se puede ver en [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 WSSs, 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 flexibles

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).

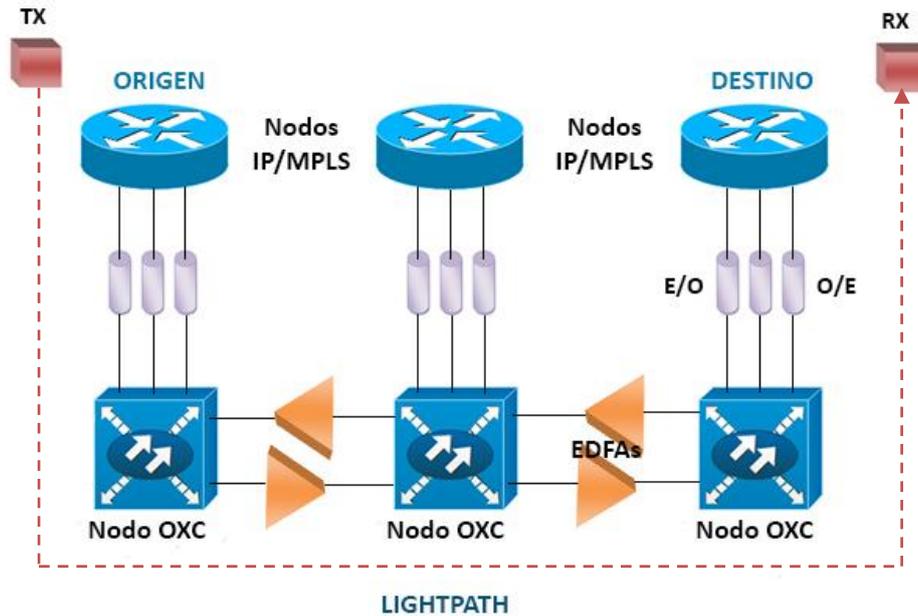


Figura 2. Establecimiento de *lightpath* entre el nodo origen y destino.

## 5. Análisis de capex y opex

Las diferentes maneras de implementación incurren en diferentes modelos de costos 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 modelo tecno-económico de las redes elásticas.

## Capítulo III

### Estudio del coste tecno-económico en redes elásticas

A lo largo del capítulo se analizarán los costes tanto de opex como de capex.

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 mantiene igual, salvo si se producen actualizaciones en la infraestructura de la red.

Los costes se representarán normalizados, definiendo una unidad de coste (u.c.) como el coste de un transpondedor fijo de 10 Gb/s.

#### 1. Costes de Capital (capex)

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

##### Capex por equipamiento

##### Transpondedor

En el caso de los transpondedores, lo primero que se tiene que tener en cuenta es el tipo de modulaciones que se van a utilizar, ya que en función de ello se pueden obtener distintos valores de capacidad y alcance máximo. Estos valores junto con el coste de los transpondedores se muestran en la Tabla 1.

Por subportadora de 12,5 GHz			
Formato de modulación	Capacidad (Gb/s)	Coste (u.c)	Alcance máximo (km)
BPSK	12,5	36 para una tasa máxima de 400 G	4000
QPSK	25		2000
8QAM	37,5		1000
16QAM	50		500
32QAM	62,5		250
64QAM	75		125

Tabla 1. Valores de capacidad (Gb/s), coste (u.c) y alcance máximo transparente (km), respecto al formato de modulación [6][7][10].

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, un transpondedor en el nodo A, y de igual forma otro transpondedor en el nodo B. Por este motivo se dice que por cada *lightpath* se utiliza un transpondedor, si bien no deja de ser una aproximación ya que si solo hubiera un *lightpath* entre A y B ya se emplearían dos transpondedores, pero solo se usaría la parte transmisora del transceptor situado en A y la receptora del transpondedor situado en B.

Aunque en la tabla se indica que el coste es de 36 unidades para una tasa máxima de 400 G (lo que limitaría el número de subportadoras que podrían generarse con el transpondedor), no se ha considerado esa limitación en el estudio actual.

Una vez entendido este concepto para calcular el capex lo que se hará es multiplicar el número de transpondedores, que corresponde con el número de *lightpaths* total, por 36 que es el coste de cada transpondedor.

$$capex_{total_{transpondedores}} [u. c.] = \sum_{nodo} capex_{transpondedores_{nodo}} \quad (1.1)$$

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

### 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 2. Valores de coste (u.c) por amplificador [6][7].

Por tanto el capex de los amplificadores será:

$$capex_{total_{amplificadores}} [u. c.] = \sum_{enlace} capex_{amplificadores_{enlace}} \quad (1.3)$$

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

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

### Optical cross-connects (OXC)

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 WSSs. Dicho coste, para los WSS flexibles es 5.

Elemento	Coste (u.c.)
WSS	5

Tabla 3. 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:

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

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

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

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

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:

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

El coste de los OXC viene determinado por:

$$capex_{\text{total}_{\text{OXC}}} [u. c.] = \sum_{\text{nodo}} capex_{\text{OXC}_{\text{nodo}}} \quad (1.7)$$

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

### 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 viene determinado 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 4. 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.

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

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 4, lo cual planteaba un problema de cara a los costes. La Figura 3 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, mostrada en la Figura 3, queda:

$$capex_{equipamiento\ IP_{nodo}} [u.c.] = \begin{cases} 3,2857 \cdot n^{\circ} puertos_{nodo} + 30, & \text{si } n^{\circ} puertos_{nodo} < 16 \\ 1,5569 \cdot n^{\circ} puertos_{nodo} - 110,1750 & \text{si } n^{\circ} puertos_{nodo} \geq 16 \end{cases} \quad (1.10)$$

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 a priori para conocer el número de puertos por nodo, debido a que 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,

$$capex_{equipamiento\ IP_{nodo}} [u.c.] = 11,2284 \cdot n^{\circ} puertos_{nodo} \quad (1.11)$$

Por tanto, con este modelo (también mostrado en la Figura 3) el capex por puerto es constante e igual a 11,2284 u.c. Este será el modelo que se use en este trabajo.

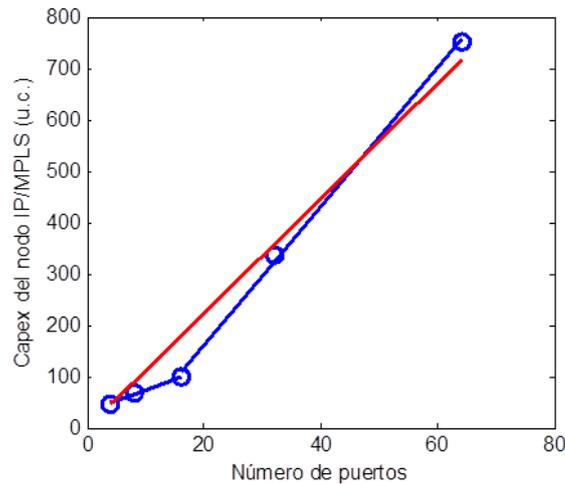


Figura 3. Modelos de capex de un nodo IP/MPLS en función del número de puertos. Se muestra en azul el modelo lineal de dos tramos (así como los datos originales de la tabla) y en rojo el modelo lineal pasando por el origen.

### 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)

### Aspectos previos a tener en cuenta

#### Dispositivos activos

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 estudio aquellos dispositivos que no son usados se les considera que no consumen potencia.

De la misma manera para el cálculo de costes de reparación sólo se tendrán en cuenta aquellos considerados como activos, dado que si un dispositivo no está transmitiendo tráfico sus posibilidades de fallo son mínimas.

Por otro lado para el mantenimiento se tendrán en cuenta todos los dispositivos, ya que el mantenimiento afecta a todos los equipos estén encendidos o apagados.

### 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 soportar distintas subportadoras con diferentes formatos de modulación. Es por ello que en este estudio y a lo largo del trabajo se considerará que un solo transpondedor tendrá las características necesarias para que se puedan soportar varios formatos de modulación en una misma conexión. 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.

Es interesante enfatizar en este punto que una conexión eléctrica puede atravesar varios *lightpaths*, algunos que se establecerán y otros que ya estén establecidos. Y que por cada *lightpath* tiene que haber un transpondedor (como ya se explicó anteriormente) aunque este puede llevar varias conexiones eléctricas multiplexadas. (Por simplificar, se cuantificará la potencia del transpondedor asociado a un *lightpath* asociándola al nodo origen del mismo).

El cálculo se realizará sumando la potencia de cada transpondedor:

$$potencia_{total\ transpondedores} [W] = \sum_{nodo} potencia_{transpondedores\ nodo} \quad (2.1)$$

Siendo la potencia de cada transpondedor, como se ha explicado al principio, el número de subportadoras de cada formato de modulación que utiliza el *lightpath* por su potencia correspondiente.

$$\begin{aligned} potencia_{transpondedores\ nodo} [W] &= n^{\circ} subportadoras_{nodo\ QPSK} \cdot 133,416 \\ &+ n^{\circ} subportadoras_{nodo\ 16QAM} \cdot 175,498 \\ &+ n^{\circ} subportadoras_{nodo\ 64QAM} \cdot 217,581 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Para saber la potencia de cada subportadora dependiendo del tipo de modulación se puede ver en la Tabla 5.

Formato de modulación	Por subportadora de 12,5 GHz	
	Capacidad (Gb/s)	Potencia (W)
<b>BPSK</b>	12,5	112,374
<b>QPSK</b>	25	133,416
<b>8QAM</b>	37,5	154,457
<b>16QAM</b>	50	175,498
<b>32QAM</b>	62,5	196,539
<b>64QAM</b>	75	217,581

Tabla 5. Valores de capacidad (Gb/s) y potencia (W) de los transpondedores, respecto el formato de modulación [6][8].

Como se puede ver en la tabla, los cálculos se realizan por subportadora transmitida, teniendo en cuenta a lo largo de todo el estudio que las subportadoras ocupan un ancho de banda de 12,5 GHz, es decir, un slot.

### Amplificadores

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

La potencia total de los amplificadores [8] es:

$$\begin{aligned} potencia_{total\text{amplificadores}} [W] \\ = \sum_{\text{enlace}} \sum_{\text{equipos por enlace}} potencia_{\text{equipo amplificador}} \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} potencia_{\text{equipo amplificador}} [W] \\ = 140 + 30 \cdot n^{\circ} \text{ EDFAs activos en el equipo} \end{aligned} \quad (2.4)$$

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

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

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

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

### WSS/OXCs

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

$$potencia_{total\text{WSS}} [W] = \sum_{\text{nodo}} potencia_{\text{WSS}_{\text{nodo}}} \quad (2.5)$$

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

$$potencia_{\text{WSS}_{\text{nodo}}} [W] = f \cdot 85 + \alpha \cdot 100 + 150 \quad (2.6)$$

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 10 W/Gbps [13], por tanto:

$$potencia_{total\text{equipos IP}} [W] = \sum_{\text{nodo}} potencia_{\text{equipo IP}_{\text{nodo}}} \quad (2.7)$$

$$potencia_{equipo\ IP_{nodo}}[W] = tráfico\ gestionado_{nodo} \cdot 10 \quad (2.8)$$

### Potencia total y coste

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

$$\begin{aligned} potencia_{TOTAL}[W] &= potencia_{total\ amplificadores} + potencia_{total\ WSS} \\ &+ potencia_{total\ equipos\ IP} + potencia_{total\ transpondedores} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Una vez calculado el coste por potencia se necesitan calcular los costes por consumo de potencia. 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:

$$OPEX_{potencia}[u.c] = potencia_{TOTAL}[W] \cdot \frac{0,0000205[\frac{u.c.}{kWh}]}{1000[\frac{W}{kW}]} \quad (2.10)$$

### 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:

$$\begin{aligned} coste_{equipo\ reparación+sustitución}[u.c.] &= coste\ reparación_{equipo} + capex_{equipo} \end{aligned} \quad (2.11)$$

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

$$\begin{aligned} opex_{tipo\ equipo\ reparación+sustitución}[u.c./h] &= \frac{\sum_{equipos\ de\ cierto\ tipo} coste_{equipo\ reparación+sustitución}}{MTBF} \end{aligned} \quad (2.12)$$

A continuación se suman los costes de todos los elementos y se calcula el coste final:

$$\begin{aligned}
 OPEX_{\text{totales, reparación+sustitución}} [u. c./h] \\
 = \sum_{\text{tipos de equipo}} opex_{\text{tipo equipo, reparación+sustitución}}
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

El tiempo medio entre fallos, se presenta en tres escenarios, optimista, nominal y conservativo.

MTBF(h)	Optimista	Nominal	Conservativo
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 conservativo, por fallo para los distintos equipos de red [6][11][12].

A lo largo del estudio tecno-económico se ha utilizado el MTBF nominal para realizar los cálculos.

### Costes de alquiler y mantenimiento de las instalaciones

El coste del alquiler son 0,27 unidades de coste por metro cuadrado y mes.

	Coste(c.u.)
Por m <sup>2</sup> por año	0,27

Tabla 8. Coste de alquiler por metro cuadrado por año [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

	<b>64 puertos</b>	64
--	-------------------	----

Tabla 9. Slots para los distintos equipos de red.

Siendo el número de slots totales:

$$\begin{aligned}
 slots_{totales_{nodo}} &= slots_{OXC/WSS_{nodo}} + slots_{transpondedores_{nodo}} \\
 &+ slots_{nodos\ IP/MPLS_{nodo}}
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

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>.

Slots por Shelf	Shelves por Rack	Metros cuadrados por Rack
16	4	0,642

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

Una vez obtenidos los metros cuadrados, 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:

$$shelves_{nodo} = \left\lceil \frac{slots_{totales_{nodo}}}{16} \right\rceil
 \tag{2.15}$$

$$racks_{nodo} = \left\lceil \frac{shelves}{4} \right\rceil
 \tag{2.16}$$

$$metros\ cuadrados\ por\ rack_{nodo} = racks \cdot 0,642
 \tag{2.17}$$

$$\begin{aligned}
 OPEX_{alquiler+mantenimiento_{nodo}} [u. c./h] &= metros\ cuadrados\ por\ rack_{nodo} \cdot 0.27 \cdot \frac{u. c}{mes} \cdot \frac{1\ mes}{30\ dia} \\
 &\cdot \left( \frac{1\ dia}{24\ horas} \right)
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

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

$$OPEX_{total_{alquiler+mantenimiento}} [u. c./h] = \sum_{nodo} OPEX_{alquiler+mantenimiento_{nodo}}
 \tag{2.19}$$

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:

$$\begin{aligned}
 OPEX_{total}[u. c.] &= OPEX_{potencia} + OPEX_{alquiler+mantenimiento} + OPEX_{reparación+sustitución} \quad (2.20)
 \end{aligned}$$

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

### 3. Ejemplo de estudio

Para entender mejor el coste de capex y opex se va a proponer un caso de estudio cuyas características principales se ven en la Figura 4.

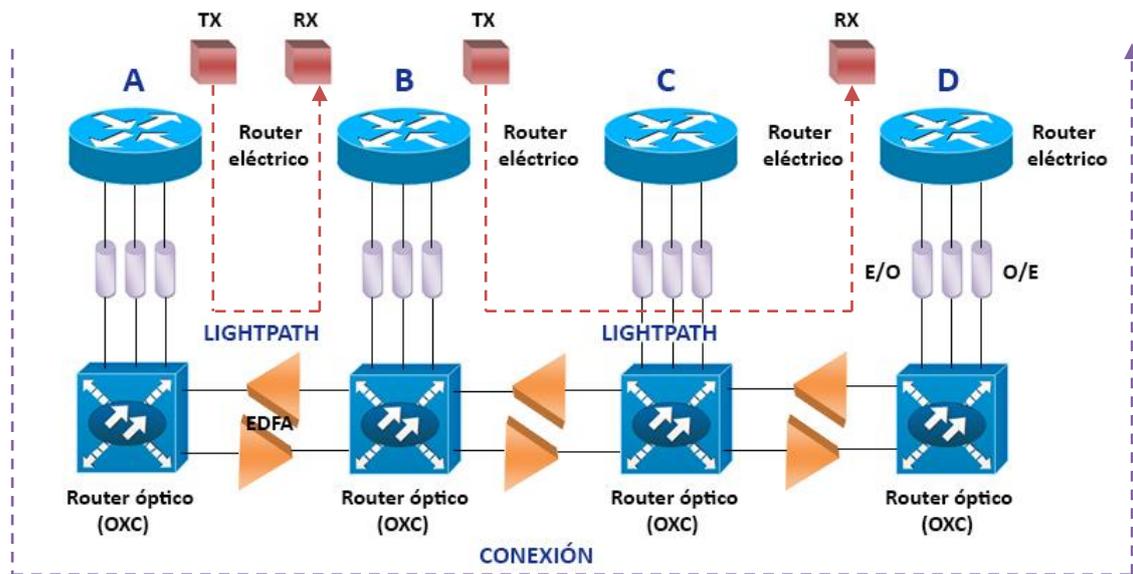


Figura 4. Ejemplo del establecimiento de una conexión que atraviesa dos *lightpaths* diferentes.

Hay que tener en cuenta que el ejemplo que se va a tratar a continuación carece del dinamismo que tienen las redes ópticas elásticas, de manera que es solo una primera aproximación al modelo de costes utilizado.

En la imagen lo que se muestra es una conexión eléctrica de 125 Gbps cuyo origen es A y cuyo destino es D, dicha conexión atraviesa dos *lightpaths* para transmitir el tráfico y emplea en ambos *lightpaths* una subportadora QPSK (25 Gbps) y dos subportadoras 16 QAM (2x50 Gbps).

#### CAPEX

##### Calculo de la potencia consumida por equipamiento

###### Amplificadores

En la Figura 4 se puede ver como hay tres equipos amplificadores, cada uno compuesto por dos EDFAs lo cual proporciona la bidireccionalidad de la conexión.

Aplicando las fórmulas 1.3 y 1.4 y la Tabla 2 del capex de los amplificadores, aplicado al estudio dará como resultado:

$$capex_{total_{amplificadores}} [u. c.] = 1 \cdot 2 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 2 = 6$$

### Transpondedores

Al estar establecidos dos *lightpaths* por cada uno de ellos habrá un transpondedor, esto supondrá que el coste total, al aplicar las fórmulas 1.1 y 1.2 y la Tabla 1, sea:

$$capex_{total_{transpondedores}} [u. c.] = 2 \cdot 36 = 72$$

### OXC

Para calcular el capex por OXC lo primero que se tiene que tener en cuenta es el parámetro ' $f$ ', considerado como el número de fibras unidireccionales con las que está conectado el nodo. Haciendo este análisis sobre la red propuesta:

1. Para el nodo A,  $f=2$ , ya que está conectado a dos fibras unidireccionales.
2. Para el nodo B,  $f=4$ , ya que está conectado a cuatro fibras unidireccionales, dos entrantes y dos salientes.
3. Para el nodo C,  $f=4$ , ya que está conectado a cuatro fibras unidireccionales, dos entrantes y dos salientes.
4. Para el nodo D,  $f=2$ , ya que está conectado a dos fibras unidireccionales.

Lo siguiente que se tiene que ver es el parámetro ' $\alpha$ ' como máximo entre número de *lightpaths* entrantes y salientes:

1. Para el nodo A,  $\alpha = 1$ , ya que solo sale un *lightpath*.
2. Para el nodo B,  $\alpha = 1$ , ya que entra y sale un *lightpath*.
3. Para el nodo C,  $\alpha = 0$ , ya que no entra ni sale ningún *lightpath*.
4. Para el nodo D,  $\alpha = 1$ , ya que solo entra un *lightpath*.

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

Con todo ello el número de WSS que se necesitan por nodo para los nodos A y D al aplicar la fórmula 1.5:

$$\text{NúmeroWSS}_{A/D} = \left( 2 + 2 + 2 \cdot \left\lceil \left( \frac{9 - \alpha}{9} \right) \right\rceil \right) = 4$$

Para los nodos B y C:

$$\text{NúmeroWSS}_{B/C} = \left( 4 + 2 + 2 \cdot \left\lceil \left( \frac{9 - \alpha}{9} \right) \right\rceil \right) = 6$$

Teniendo en cuenta que el coste por WSS es 5 y aplicando las fórmulas 1.7 y 1.8 y la Tabla 3, el capex para los nodos A y D:

$$capex_{OXCA/D} [u. c.] = \text{NúmeroWSS}_{A/D} \cdot 5 = 4 \cdot 5 = 20$$

Para los nodos A y D:

$$capex_{OXCB/C} [u. c.] = \text{NúmeroWSS}_{B/C} \cdot 5 = 6 \cdot 5 = 30$$

Para los nodos A y D:

$$capex_{TOTAL\ oxc}[u.c.] = 20 + 20 + 30 + 30 = 100$$

### Equipos IP/MPLS

El capex de los equipos IP/MPLS dependerá del número de puertos de los que disponga y eso está relacionado con la cantidad de tráfico que es capaz de procesar. En este ejemplo concreto, los nodos A, B y D solo tienen que tratar 125 Gbps y el nodo C no gestiona tráfico, de modo que es suficiente con contar con equipos IP de 4 puertos (se supondrá que también hay un equipo IP en el nodo C aunque en realidad no se usaría), los cuales tienen un coste de 45 u.c. (en este ejemplo se usa directamente el dato de la Tabla 4, aunque en las simulaciones se usa el modelo lineal aproximado), por lo que el capex total al aplicar la fórmula 1.9, y teniendo en cuenta que hay 4 nodos IP/MPLS, sería:

$$capex_{equipamiento\ IP}[u.c.] = 45$$

$$capex_{total\ equipamiento\ IP}[u.c.] = 45 \cdot 4 = 180$$

### *Cálculo del capex*

Finalmente se calcula el capex total:

$$capex_{TOTAL}[u.c.] = 6 + 72 + 100 + 180 = 358$$

### **OPEX**

#### *Coste por consumo de potencia*

En el caso del consumo de potencia como ya se ha dicho anteriormente se tendrán en cuenta aquellos equipos que se consideren activos.

#### Amplificadores

En este caso hay que tener en cuenta que si la conexión no es bidireccional de los dos EDFAs solo se utilizaría uno de los dos de los que dispone el equipo. Por el contrario si la conexión es bidireccional habría que tener en cuenta los seis EDFAs de los que dispone la red.

En el ejemplo mostrado la conexión es unidireccional de manera que sólo se utilizan tres EDFAs.

El consumo de potencia, teniendo en cuenta las ecuaciones 2.3 y 2.4, será:

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

$$potencia_{total\ amplificadores}[W] = 170 + 170 + 170 = 510$$

#### Transpondedores

En la lo que se presenta es un *lightpath* que transmite distintas conexiones, las cuales a su vez utilizan diferentes slots.

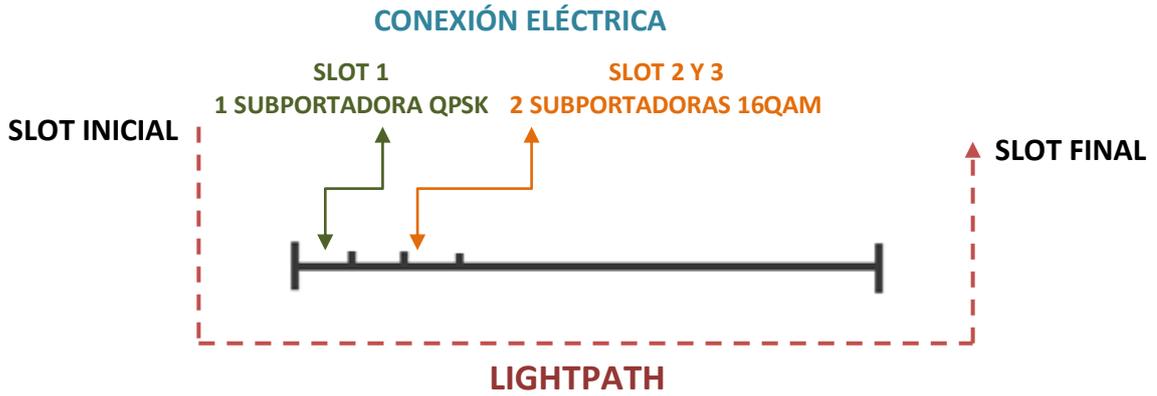


Figura 5. Ejemplo de una conexión que va por un lightpath y cuyas subportadoras no tienen el mismo formato de modulación

En este caso como se puede ver se están utilizando tres slots para la conexión eléctrica, y se transmiten tres subportadoras, dos cuyo tipo de modulación es 16QAM y otra cuyo tipo es QPSK. De manera que el consumo de potencia aplicando las fórmulas 2.1 y 2.2 y la Tabla 5 sería:

$$potencia_{transpondedor\ A/B} [W] = 1 \cdot 133,416 + 2 \cdot 217,581 = 568,578$$

$$potencia_{transpondedor\ C/D} [W] = 0$$

$$potencia_{total\ transpondedor} [W] = 568,578 + 568,578 = 1137,156$$

### Nodos OXC

Se calcularía la potencia por cada WSS aplicando las fórmulas 2.5 y 2.6:

$$potencia_{WSS_{A/D}} [W] = 2 \cdot 85 + 1 \cdot 100 + 150 = 420$$

$$potencia_{WSS_{B/C}} [W] = 4 \cdot 85 + 1 \cdot 100 + 150 = 590$$

$$potencia_{total\ WSS} [W] = 420 + 590 + 420 + 590 = 2020$$

### Nodos IP/MPLS

Para calcular el consumo de potencia de los equipos IP/MPLS, basta con saber la capacidad de tráfico que transmite cada nodo de los nodos activos en los que empieza o acaba un *lightpath*.

El nodo A transmite tráfico a nivel de la capa eléctrica (IP/MPLS), en total 125 Gbps. El nodo B recibe esos 125 Gbps y los retransmite, por lo tanto, también gestiona 125 Gbps. El nodo C no recibe ni transmite tráfico (a nivel IP), mientras que el nodo D recibe 125 Gbps, por lo que ese es el tráfico que gestiona. Así pues:

$$tráfico\ gestionado_{nodo\ A/B/D} [Gbps] = 125$$

$$tráfico\ gestionado_{nodo\ C} [Gbps] = 0$$

Una vez hallado el tráfico gestionado en Gbps basta con multiplicarlo por su 10 W/Gbps para tener el consumo, de la manera expuesta en la fórmula 2.7 y 2.8.

$$potencia_{total\text{equipos IP}} [W] = 1250 + 1250 + 1250 = 3750$$

### Opex total por consumo de potencia

Se calcula el consumo de potencia total:

$$potencia_{TOTAL} [W] = 510 + 1137,156 + 2020 + 375 = 7417,156$$

A partir de aquí se calcula el coste por consumo de potencia:

$$opex_{potencia} [u. c./h] = 7417,156 \cdot 0,0000205/1000 = 0,0001521$$

### Coste por reparación y sustitución

Para calcular los costes de reparación lo que se tiene que hacer es realizar los cálculos por cada equipo con las fórmulas vistas anteriormente, para calcular finalmente el Opex referente a la reparación y sustitución de los equipos.

Respecto a los equipos amplificadores el coste por reparación y sustitución se estudiará para los EDFAs activos de la red. En concreto hay tres EDFAs y todos ellos tienen los mismos costes de reparación y sustitución en caso de que sea necesario dicho evento. Es importante notar que aquí se tiene únicamente en cuenta el coste de cada EDFA unidireccional activo:

$$coste_{EDFA\text{reparación+sustitución}} [u. c.] = 0,1 + 1 = 1,1$$

Por lo que el opex debido a la reparación/sustitución de amplificadores de la red, teniendo en cuenta que el MTBF para este tipo de dispositivos es 250000 h, viene dado por:

$$\begin{aligned} opex_{amplificadores\text{reparación+sustitución}} [u. c./h] &= \frac{1,1 + 1,1 + 1,1}{250000} = \frac{3,3}{250.000} \\ &= 0,0000132 \end{aligned}$$

En el caso de los transpondedores, en el estado actual de la red hay dos, y ambos tienen el mismo coste de reparación y sustitución:

$$coste_{transpondedor\text{reparación+sustitución}} [u. c.] = 0,1 + 36 = 36,1$$

Así pues, teniendo en cuenta un MTBF de 350000 h:

$$opex_{transpondedores\text{reparación+sustitución}} [u. c./h] = \frac{36,1 + 36,1}{350000} = \frac{72,2}{350000} = 0,000206$$

Con respecto a los OXC hay que tener en cuenta que los costes de reparación y sustitución depende de los WSS:

$$coste_{WSS\text{reparación+sustitución}} [u. c.] = 0,2 + 5 = 5,2$$

Hay 4 WSS en el nodo A, 6 WSS en el B, 6 en el C y 4 en el D. Por otro lado, puesto que el MTBF asociado a los WSS es de 300000 horas:

$$\begin{aligned} \text{opex}_{\text{WSS}_{\text{reparación+sustitución}}} [\text{u. c./h}] &= \frac{(5,2 \cdot 4) + (5,2 \cdot 6) + (5,2 \cdot 6) + (5,2 \cdot 4)}{300000} \\ &= \frac{104}{300000} = 0,0003467 \end{aligned}$$

Con respecto a los equipos IP, realmente hay que tener en cuenta que las averías están relacionadas con los puertos IP asociados. Se supondrá que el coste por puerto IP es igual al coste del equipo IP dividido entre el número de puertos que tiene. Todos los equipos que se consideran en los estudios tienen el mismo número de puertos, lo cual simplifica las operaciones. En este ejemplo concreto, los equipos IP tienen 4 puertos y un coste total de 45 u.c., es decir, 45/4 u.c. por cada puerto. Así pues,

$$\text{coste}_{\text{puerto IP}_{\text{reparación+sustitución}}} [\text{u. c.}] = 0,1 + \frac{45}{4}$$

Finalmente, en el estado actual de la red solo hay 3 equipos IP gestionando tráfico (en el nodo A, B y D). El nodo A está gestionando 125 Gbps y cada puerto es capaz de tratar hasta 40 Gbps, de modo que el número de puertos activos en este nodo es:

$$\text{puertos activos}_{\text{equipo IP nodo A}} = \left\lceil \frac{125}{40} \right\rceil = 4$$

El nodo B y el nodo D gestionan el mismo tráfico y por tanto su número de puertos activos es el mismo, es decir, 4 cada uno. El nodo C no tiene ningún puerto activo. Así pues, teniendo en cuenta que el MTBF para un puerto IP es de 85000 horas:

$$\begin{aligned} \text{opex}_{\text{puertos IP}_{\text{reparación+sustitución}}} [\text{u. c./h}] \\ &= \frac{\left(0,1 + \frac{45}{4}\right) \cdot 4 + \left(0,1 + \frac{45}{4}\right) \cdot 4 + 0 + \left(0,1 + \frac{45}{4}\right) \cdot 4}{85000} = \frac{136,2}{85000} \\ &= 0,00160235 \end{aligned}$$

Siendo el coste total del opex debido a reparación y sustitución:

$$\begin{aligned} \text{OPEX}_{\text{totales}_{\text{reparación+sustitución}}} [\text{u. c./h}] &= \frac{3,3}{250.000} + \frac{72,2}{350.000} + \frac{104}{300.000} + \frac{136,2}{85.000} \\ &= 0,0021685 \end{aligned}$$

### Coste por alquiler y mantenimiento

En el este caso lo que hay que calcular es el número de slots totales.

Antes de realizar los cálculos hay que recordar que por cada transpondedor se necesita un slot, por cada WSS dos slots y por cada equipo IP tantos slots como puertos (en este caso se ha supuesto el uso de equipos de cuatro puertos por lo que se tiene cuatro slots por cada nodo IP/MPLS). El resumen de slots por equipamiento se puede ver en la Tabla 9.

Debe tenerse en cuenta, en lo referido a WSS y puertos IP/MPLS que hay que considerar todos los elementos presentes en la red, independientemente de si están activos o no.

Equipos	Nodo A	Nodo B	Nodo C	Nodo D
OXC/WSS	2·4	2·6	2·6	2·4
Transpondedores	1	0	1	0
Puertos IP/MPLS	4	4	4	4

Tabla 11. Número de equipos OXC, IP/MPLS y transpondedores en el ejemplo de estudio.

$$slots_{nodo A} = 8 + 1 + 4 = 13$$

$$slots_{nodo B} = 12 + 0 + 4 = 16$$

$$slots_{nodo C} = 12 + 1 + 4 = 17$$

$$slots_{nodo D} = 8 + 0 + 4 = 12$$

Una vez calculado el número de slots por nodo lo que queda por hacer es calcular el número de metros cuadrados que corresponde con los equipos utilizados. Para ello hay que calcular el número de 'shelves' por 'rack', sabiendo que 16 slots son un 'shelf', y a partir de ahí sacar el número de 'racks', sabiendo que por cada 4 'shelves' hay un 'rack'.

Solo queda calcular el número de metros cuadrados sabiendo que cada rack son 0,642 m<sup>2</sup>.

Los cálculos por nodo aplicando las fórmulas 2.14, 2.19, 2.15, 2.16, 2.17 y 2.18 y la Tabla 10 y Tabla 8 serían:

$$shelves_A = \left\lceil \frac{13}{16} \right\rceil = 1 \quad shelves_B = \left\lceil \frac{16}{16} \right\rceil = 1$$

$$shelves_C = \left\lceil \frac{17}{16} \right\rceil = 2 \quad shelves_D = \left\lceil \frac{12}{16} \right\rceil = 1$$

$$racks_{A/B/D} = \left\lceil \frac{1}{4} \right\rceil = 1$$

$$racks_C = \left\lceil \frac{2}{4} \right\rceil = 1$$

$$metros \text{ cuadrados por rack}_{A/B/C/D} = 1 \cdot 0,642 = 0,642$$

Una vez calculados los metros cuadrados por nodo se calcula el opex total de alquiler y mantenimiento a partir de los resultados para todos los nodos:

$$opex_{total_{alquiler+mantenimiento}} [u. c/h] = \frac{0,642 \cdot 4 \cdot 0,27}{30 \cdot 24} = 0,000963$$

**Opex total**

El opex total es:

$$opex_{total}[u. c./h] = 0,00008286419 + 0,0021685 + 0,000963 = 0,00341$$

# Capítulo IV

## Contexto del estudio de simulación

### 1. Topología de la red de simulación

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

Para empezar lo primero que se va a ver es la topología física de la red (Figura 6). Como se puede comprobar los nodos se conectan de manera bidireccional, es por ello que lo que se ve son enlaces, formados cada uno por dos fibras que proporcionan dicha bidireccionalidad. Se supondrá además que hay un amplificador por cada enlace.

En la imagen se puede ver como la 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.

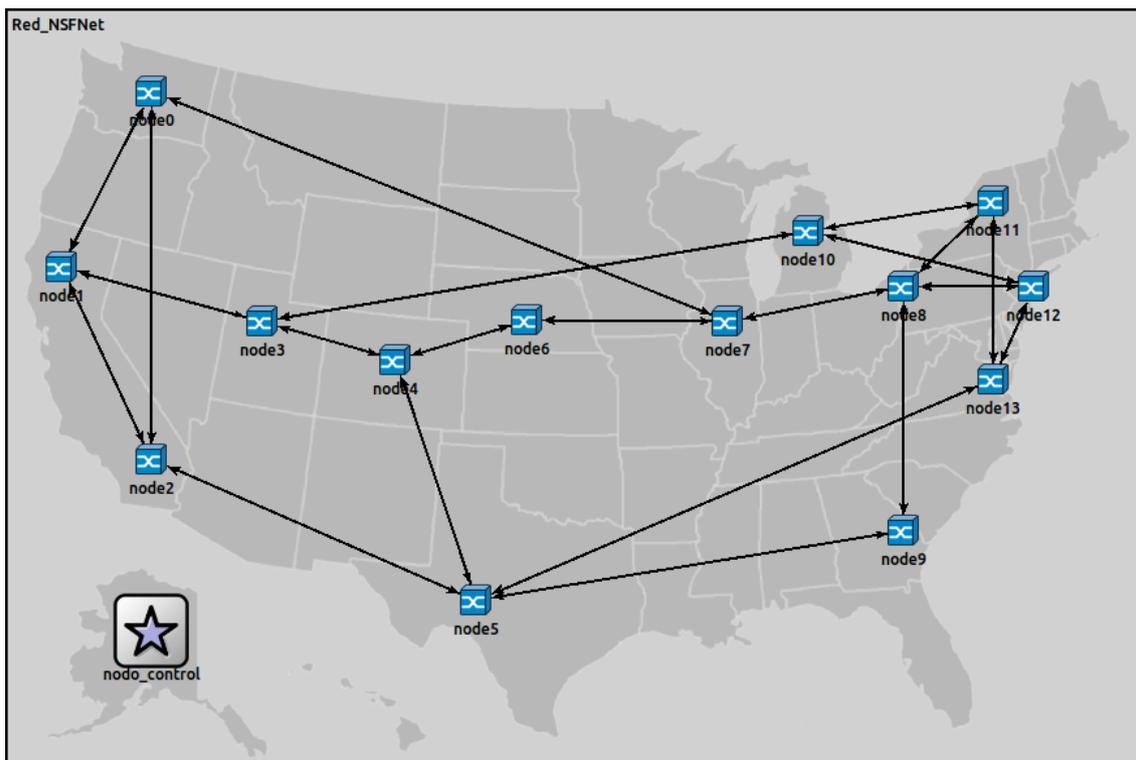


Figura 6. Red de simulación para el estudio del capex y opex.

### 2. Algoritmo utilizado

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 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 o establecidos en la red.

Mientras 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 eléctricas adyacentes se deben respetar dos slots de guarda. Por otro lado, con respecto a las conexiones ópticas (*lightpaths*), 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 sus correspondientes arcos

Para resolver el encaminamiento lo primero es diseñar un grafo auxiliar que represente el estado actual de la red [1][3]. El grafo en el que se basa el simulador es un grafo auxiliar multicapa que se construya cada vez que se haya una petición de conexión eléctrica entrante. Los vértices en cada capa se corresponden con los nodos de la topología de la red física.

La primera capa del grafo multicapa creado se denomina capa eléctrica. A continuación el grafo tendría varias capas de espectro. Las capas de espectro en el grafo auxiliar se utilizan para representar los recursos de espectro disponible en las fibras ópticas de la red.

Para poder establecer un nuevo *lightpath* es requisito necesario que haya suficiente capacidad para poder establecerlo, y que además se cumpla la restricción de continuidad de espectro y los slots de guarda.

En este sentido existen tres tipos de arcos que puede haber en el grafo:

### - *Lightpath-edge*

Habría este tipo de arco siempre que haya *lightpaths* en la capa eléctrica del grafo auxiliar que tengan la capacidad suficiente o el número de slots consecutivos necesarios para establecer la conexión correspondiente a la creación del grafo.

### - *Spectrum-edge*

Habría este tipo de arco siempre que haya enlaces de fibra óptica entre dos nodos en la capa de espectro, y estos tengan el número mínimo de slots consecutivos sin usar necesarios para establecer la conexión empezando desde el slot  $i$ -ésimo,

en esa fibra.

### - *Transponder-edge*

Habrà este tipo de arco entre las capas eléctricas y ópticas siempre que los nodos por los que atraviere la conexión puedan ser nodos de origen y destino, es decir, tengan la propiedad de conversión eléctrica a óptica y viceversa. Si la posibilidad de conversión es completa, es decir O/E/O, los enlaces serán bidireccionales.

## Algoritmo para resolver el encaminamiento de las conexiones

El algoritmo [1][3] se aplica de la siguiente manera:

- Cuando una petición de conexión llega al nodo de control:
  - Se ejecuta el algoritmo de Dijkstra, el algoritmo de caminos mínimos, devolverá el camino de menor coste. Si el camino devuelto está vacío significa que no hay.
  - En caso de que el establecimiento de la conexión eléctrica sea viable, habrá que decidir cómo establecerla:
    - Si el camino más corto atraviesa uno o varios *Lightpath-edges* significa que para establecer la conexión se deberá encaminar multiplexándola por uno o varios *lightpaths* ya establecidos en la red.
    - Si atraviesa uno o varios *Spectrum-edges* consecutivos, significa que se deberá establecer uno o varios *lightpaths* nuevos en la red. Para esto se necesita saber:
      - El origen y el destino de cada nuevo *lightpath*, que viene dado por los nodos físicos en los que se recorren los *Transponder-edges*.
      - La ruta de cada *lightpath* a establecer en la red física.
      - Y por último, cuál será el espectro que ocupa dentro de estos enlaces o fibras, que viene dado por dos números enteros: el número de slot inicial y el número de slots ocupados. El número de slot inicial se corresponde con el número de la capa de espectro en la que el SP recorre los *spectrum-edges* en el grafo; mientras que el número de slots ocupados es propio de la petición de conexión. Además, hay que recordar que siempre hay que dejar una banda de guarda.

A nivel de gráfico se pueden resumir los pasos anteriores de la siguiente manera:

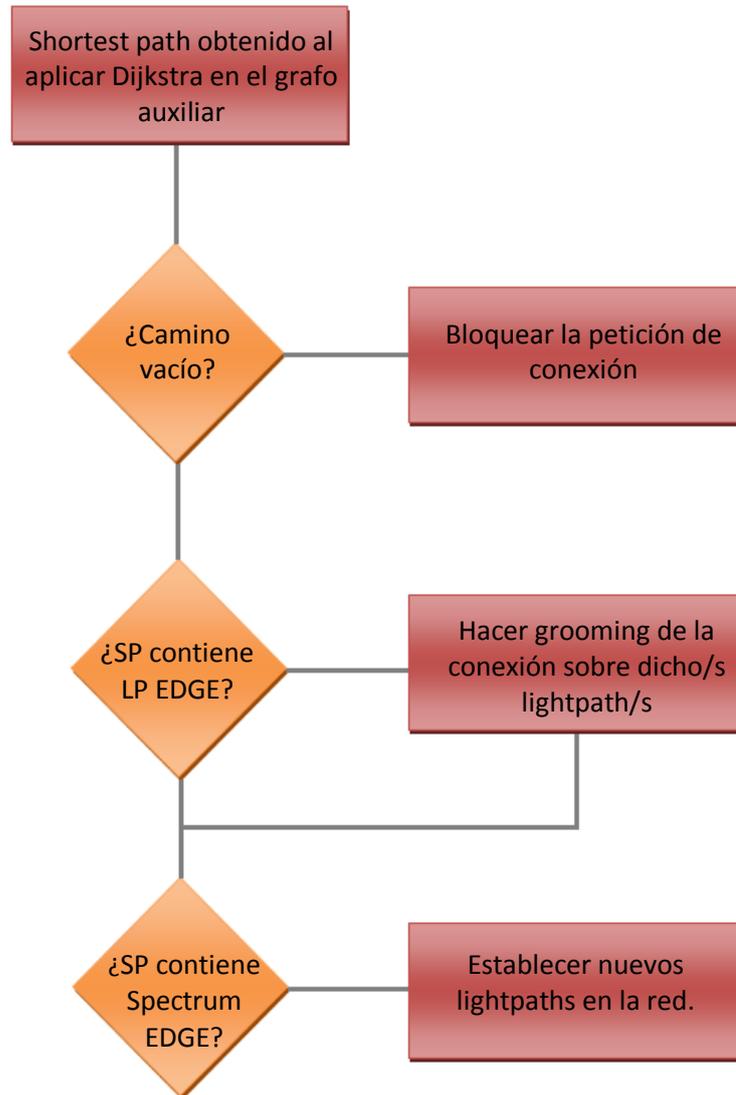


Figura 7. Algoritmo para resolver el encaminamiento de las conexiones. [3]

### 3. Políticas de *traffic grooming*

Las diferentes políticas de *grooming* [1][3] utilizadas en la simulación determinarán 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 es:

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

El fundamento principal es utilizar al máximo los *lightpaths* ya establecidos. De esta manera, los *transponder-edge* deben tener un peso mucho mayor que los *lightpath-edge* y estos mucho más peso que los *spectrum-edge*.

- **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 *transponder-edge* es ligeramente inferior que la mitad de un *lightpath-edge* y ambos deben ser mucho mayores que el peso de un *spectrum-edge*, 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 *lightpath-edge* debe ser el peso de un *spectrum-edge* 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 *transponder-edge* tiene que ser mucho menor que el de los otros dos tipos de arcos.

- **Load-Balancing (LB) o Carga Balanceada:**

El fundamento principal es minimizar la probabilidad de bloqueo. 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 *lightpath-edge* y los *spectrum-edge* debe ser proporcional al ancho de banda utilizado en sus correspondientes fibras y el peso de un *transponder-edge* tiene que ser mucho menor que estos.

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

Se propone un esquema de reserva de espectro [1][3] que permite poder 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 *lightpath* 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 mediante simulación dicho esquema hay que tener en cuenta en que momentos tiene interés implementarlo:

- 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.

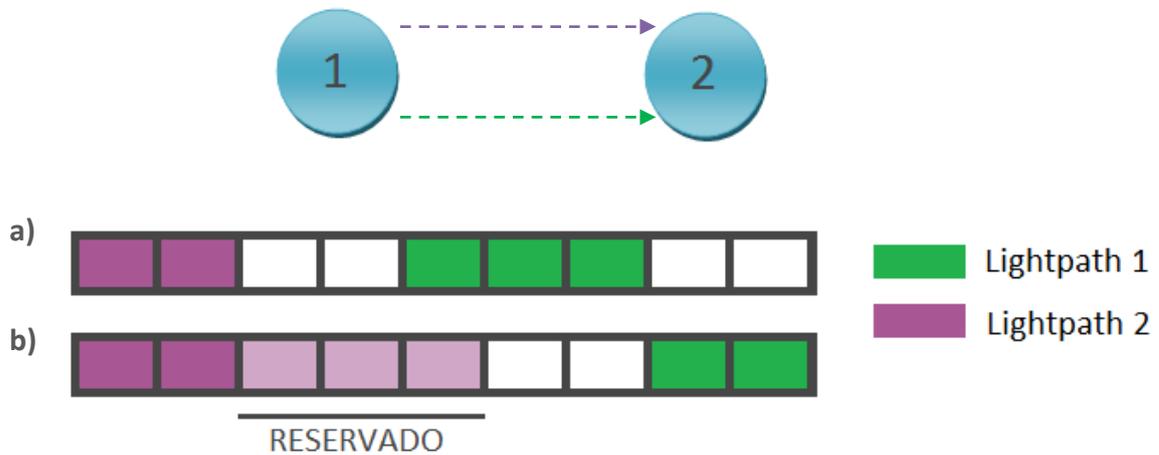


Figura 8. Diferencias entre *lightpaths* establecidos sin reservar espectro (a) y con reserva de espectro (b).

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*.

## 5. Modelo de costes

En el escenario planteado es de vital importancia el uso de equipamiento flexible, es decir que permitan redes ópticas elásticas. 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 supondrá que la máxima capacidad, y de esa manera por *lightpath*, sería de 10 slots.

Respecto a los enlaces planteados en la red de simulación tienen una capacidad máxima de 2500 GHz, que se divide en slots de 12,5 GHz, de manera que el número total de slots por fibra es de 200.

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:

- 25 Gb/s por slot QPSK.
- 50 Gb/s por slot 16QAM.
- 75 Gb/s por slot 64QAM.



Figura 9. Capacidad máxima de un *lightpath* y de los slots que contiene .

La fuente generará peticiones conexión de tres tipos:

- Con ancho de banda de 25 Gbps y una frecuencia de 10 de cada 15.
- Con ancho de banda de 100 Gbps y una frecuencia de 4 de cada 15.
- Con ancho de banda de 250 Gbps y una frecuencia de 1 de cada 15.

Con los datos anteriores, el número de slots que se necesitan para cada satisfacer las peticiones son:

- **Para peticiones de 25 Gb/s:**

- Se necesitará 1 slot para modulaciones QPSK.
- Se necesitará 1 slot para modulaciones 16 QAM.
- Se necesitará 1 slot para modulaciones 64 QAM.

- **Para peticiones de 100 Gb/s:**

- Se necesitarán 4 slots para modulaciones QPSK.
- Se necesitarán 2 slots para modulaciones 16 QAM.
- Se necesitarán 2 slots para modulaciones 64 QAM.

- **Para peticiones de 250 Gb/s:**

- Se necesitarán 10 slots para modulaciones QPSK.
- Se necesitarán 5 slots para modulaciones 16QAM.
- Se necesitarán 4 slots para modulaciones 64QAM.

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, siendo 2000 km para QPSK, 500 km para 16QAM y 125 km para 64QAM.



## Capítulo V

---

# Modelo de costes aplicado al entorno de simulación

Una vez expuestas las fórmulas para calcular el coste tecno-económico de una red óptica elástica, se va a calcular el opex del contexto planteado en el capítulo previo.

Es importante tener en cuenta que los ejemplos que se verán a continuación han sido corroborados mediante simulación.

### 1. Aspectos previos a tener en cuenta

#### Conexiones

La diferencia principal con el Capítulo III es que en este caso la red óptica es dinámica. Es por ello que para entender este modelo de costes aplicado en la simulación se van a calcular los costes por opex para las dos o tres primeras conexiones establecidas.

Dentro de cada ejemplo, se van a ver los costes para cada conexión que se establezca, incluyendo los costes por consumo de potencia, los costes de reparación y sustitución y los costes por alquiler y mantenimiento.

#### Coste por alquiler y mantenimiento

Respecto a los costes por alquiler y mantenimiento aplicado al contexto de simulación, hay que tener en cuenta que no se ha realizado el dimensionamiento de la red de los equipamientos IP y OXC. Dado que para calcular dicho coste es necesario conocer el número de recursos presentes en la red, se ha buscado un modelo alternativo, siempre basado en el modelo de costes verificado explicado en el Capítulo III.

Para el planteamiento de este nuevo modelo se ha tenido en cuenta que el equipamiento que hay en la red es fijo ya que se supone que el número de recursos de la infraestructura se mantiene constante a lo largo del tiempo de simulación.

Es por ello que la suposición que se plantea es realizar el cálculo del coste de alquiler y mantenimiento al final de la simulación tomando como valores de dimensionamiento el número máximo de recursos que se hayan utilizado en los distintos nodos a lo largo de la simulación (aunque realmente ésta no sea la forma más adecuada de dimensionar una red).

Para realizar dicho cometido se creará una tabla con tantas filas como nodos tenga la red a simular (en este caso 14) y tres columnas con el siguiente contenido:

- Tráfico máximo gestionado.
- WSSs activos máximos.
- Transpondedores máximos (dicho equipamiento sí que está dimensionado a priori, existiendo 60 transpondedores por nodo)

El valor del tráfico y los WSSs activos se irá almacenando a lo largo de la simulación, siendo el mayor de los casos que vayan sucediendo al establecerse y liberarse las conexiones.

Una vez obtenidos estos parámetros se puede calcular el coste por alquiler y mantenimiento. Pero para entenderlo mejor se realizarán los cálculos correspondientes a los ejemplos, teniendo en cuenta que el coste por alquiler y mantenimiento no se realizará hasta que finalice la simulación, es decir, se calculará tras los cálculos de las conexiones vistas en el ejemplo.

## 2. Entorno de simulación con un solo formato de modulación

### Primera conexión establecida

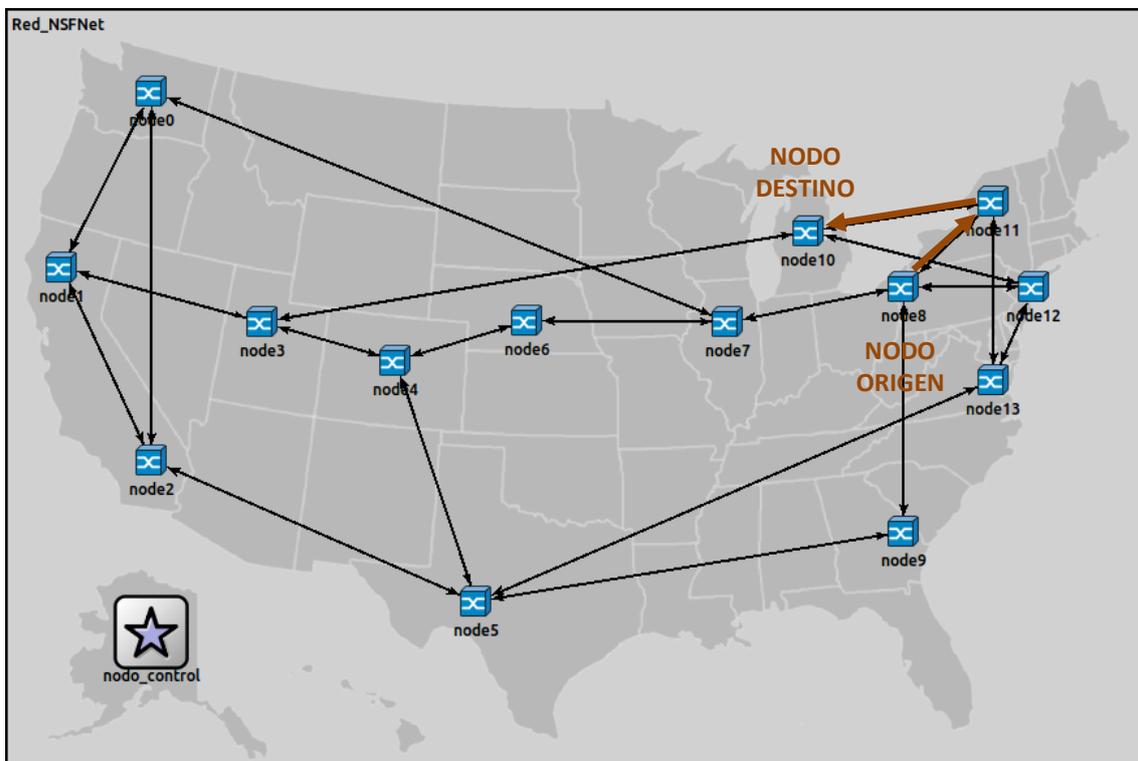


Figura 10. Establecimiento de la primera conexión en una red elástica óptica elástica con un solo formato de modulación.

<b>Ruta</b>	Nodo 8 (IP-OXC)– Nodo 11(OXC) – Nodo 10(OXC-IP)
<b>Slots ocupados</b>	1 slot QPSK (25 Gb/s)
<b>Fibras</b>	Fibras 26 (enlace 8) y 34 ( enlace 17 )

Tabla 12. Características principales de la primera conexión establecida en el entorno de simulación.

### Coste por consumo de potencia

#### Transpondedores

En este caso se ha establecido solo un *lightpath*, por lo que tomando las consideraciones anteriores en las que por cada *lightpath* se requiere el uso de un

transponedor, y la potencia de un transponedor QPSK dependerá del número de subportadoras, entonces sería:

$$potencia_{total\ transpondedores} [W] = 133,416$$

### Amplificadores

En el contexto de simulación como se ha mencionado anteriormente se tienen dos fibras por las que se ha establecido un *lightpath*, de manera que los amplificadores activos serían dos. Estas dos fibras en el simulador corresponden a las fibras 26 (enlace 15) y 34 (enlace 17). Con ello la potencia de los amplificadores sería:

$$potencia_{equipo\ amplificador\ enlace\ 15} [W] = 140 + 30$$

$$potencia_{equipo\ amplificador\ enlace\ 17} [W] = 140 + 30$$

Debido a que las fibras pertenecen a distintos enlaces habrá que sumar 140 por cada enlace por el que se transmite el tráfico y otros 30 por cada EDFA activo. En este último caso dado que la conexión es unidireccional solo se activará un EDFA de los dos que posee cada equipo amplificador dentro de un enlace.

$$potencia_{total\ amplificadores} [W] = 30 + 140 + 30 + 140 = 340$$

### Equipamiento OXC

El consumo de potencia en los nodos OXC dependerá del grado lógico entrante del nodo y del número de fibras con las que está conectado.

- Como se puede ver en la Figura 10 el nodo 8 está conectado con 4 enlaces, lo que corresponde a un total de 8 fibras que proporcionan la bidireccionalidad.

Asimismo el número de *lightpaths* que se originan en dicho nodo es 1, lo que corresponde al grado lógico.

$$potencia_{WSS\ nodo\ 8} [W] = 8 \cdot 85 + 1 \cdot 100 + 150 = 930$$

- Por su parte el nodo 11 está conectado con 6 fibras unidireccionales y en dicho nodo no comienza ni termina un *lightpath*.

$$potencia_{WSS\ nodo\ 11} [W] = 6 \cdot 85 + 0 \cdot 100 + 150 = 660$$

- Finalmente el nodo 10 está conectado, al igual que en el caso anterior a 6 fibras unidireccionales, pero en este caso finaliza un *lightpath*.

$$potencia_{WSS\ nodo\ 10} [W] = 6 \cdot 85 + 1 \cdot 100 + 150 = 760$$

Se considera que el resto de OXC no consumen potencia ya que no les atraviesa ningún *lightpath*, lo cual es una suposición optimista pues realmente algo de consumo deben tener para poder recibir al menos instrucciones desde el nodo de control. En cualquier caso, una vez que la red alcance el estado estacionario, la probabilidad de que un OXC no sea atravesado por ningún *lightpath* (considerando

cargas de tráfico realistas) es muy baja, de modo que el consumo de todos los OXC de la red quedará reflejado. Así pues, la potencia será:

$$potencia_{total_{WSS}}[W] = 930 + 660 + 760 = 2350$$

### Equipamiento IP

Para realizar este cálculo lo que había que calcular era la capacidad de los nodos IP/MPLS.

En primer lugar se van a considerar los nodos IP activos los cuales son el nodo 8 y el nodo 10, esto es así ya que un *lightpath* empieza en un nodo IP/MPLS y termina en un nodo del mismo tipo, pero no atraviesa ninguno de esos equipos en su camino. Sólo atraviesa OXC. Es por ello que el nodo 11 no se tendrá en cuenta.

$$potencia_{equipo\ IP_{nodo\ 10/8}} = 25\ Gbps \cdot 10\ W/Gbps$$

$$potencia_{total_{equipos\ IP}}[W] = 250 + 250 = 500$$

La potencia total será:

$$potencia_{TOTAL}[W] = 340 + 500 + 133,416 + 2350 = 3323,416$$

Siendo el coste correspondiente:

$$opex[u.\ c./h] = 3323,416 \cdot 0,0000205/1000 = 0,000068130028$$

### Coste por reparación sustitución

Cabe recordar en este punto que este coste se analiza para los dispositivos que se consideran activos.

### Transpondedores

Para el caso de los transpondedores el número de dispositivos activos es 1.

Combinado con las unidades de coste de capex de estos recursos que es 36 y el coste por fallo que es 0,1, entonces:

$$opex_{transpondedor_{reparación+sustitución}} = 36 + 0,1 = 36,1$$

$$opex_{transpondedores_{reparación+sustitución}}[u.\ c./h] = \frac{36,1}{350000} = 0,000103$$

### Amplificadores

Como se mencionó, el número de amplificadores activos es 2.

Siendo las unidades de coste por amplificador 1 y por fallo del equipo 0,1, entonces:

$$coste_{EDFA_{reparación+sustitución}}[u.\ c.] = 0,1 + 1 = 1,1$$

$$opex_{amplificadores_{reparación+sustitución}}[u.\ c./h] = \frac{1,1 + 1,1}{250000} = \frac{2,2}{250.000} = 0,0000088$$

**Equipamiento OXC**

Para calcular este coste, lo primero que hay que mirar es el número de WSS activos, para lo cual hay que tener en cuenta los nodos OXC activos. En este caso:

- El nodo 8 está conectado con 8 fibras unidireccionales.  
El número de *lightpaths* que se originan en dicho nodo es 1.

$$\text{Número WSS}_{\text{nodo } 8} = \left( 8 + 2 + 2 \cdot \left\lceil \left( \frac{9-9}{9} \right) \right\rceil \right) = 10$$

- El nodo 11 está conectado con 6 fibras unidireccionales.  
En dicho nodo no comienza ni termina un *lightpath*.

$$\text{Número WSS}_{\text{nodo } 11} = \left( 6 + 2 + 2 \cdot \left\lceil \left( \frac{9-9}{9} \right) \right\rceil \right) = 8$$

- El nodo 10 está conectado con 6 fibras unidireccionales.  
El número de *lightpaths* que terminan en dicho nodo es 1.

$$\text{Número WSS}_{\text{nodo } 10} = \left( 6 + 2 + 2 \cdot \left\lceil \left( \frac{9-9}{9} \right) \right\rceil \right) = 8$$

Por tanto:

$$\text{Número WSS}_{\text{total}} = 10 + 8 + 8 = 26$$

Sabiendo que las unidades de coste por WSS son 5, y por fallo de equipo 0,2, entonces:

$$\text{coste}_{\text{WSS}_{\text{reparación+sustitución}}} [\text{u. c.}] = 0,2 + 5 = 5,2$$

$$\begin{aligned} \text{opex}_{\text{WSS}_{\text{reparación+sustitución}}} [\text{u. c./h}] &= \frac{(5,2 \cdot 10) + (5,2 \cdot 8) + (5,2 \cdot 8)}{300000} = \frac{135,2}{300000} \\ &= 0,000451 \end{aligned}$$

**Equipamiento IP**

Los nodos IP activos son dos, como ya se explicó. En este punto se hace necesario calcular el número de puertos por nodo.

$$\text{puertos activos}_{\text{equipo IP nodo } 8/10} = \left\lceil \frac{25}{40} \right\rceil = 1$$

Teniendo en cuenta el modelo lineal simple en el que el coste por puerto IP es de 11,2284 u.c., el coste por reparación-sustitución es:

$$\begin{aligned} \text{coste}_{\text{puerto IP}_{\text{reparación+sustitución}}} [\text{u. c.}] &= 0,1 + 11,2284 \\ \text{opex}_{\text{puertos IP}_{\text{reparación+sustitución}}} [\text{u. c./h}] &= \frac{(0,1 + 11,2284) \cdot 1 + (0,1 + 11,2284) \cdot 1}{85000} = \frac{22,6568}{85000} \\ &= 0,000267 \end{aligned}$$

**Total**

Con todo ello el opex por reparación sustitución es:

$$\begin{aligned}
 opex_{\text{totales}_{\text{reparación+sustitución}}} &= 0,000103 + 0,0000088 + 0,000451 + 0,000267 \\
 &= 0,0008298
 \end{aligned}$$

### Segunda conexión establecida

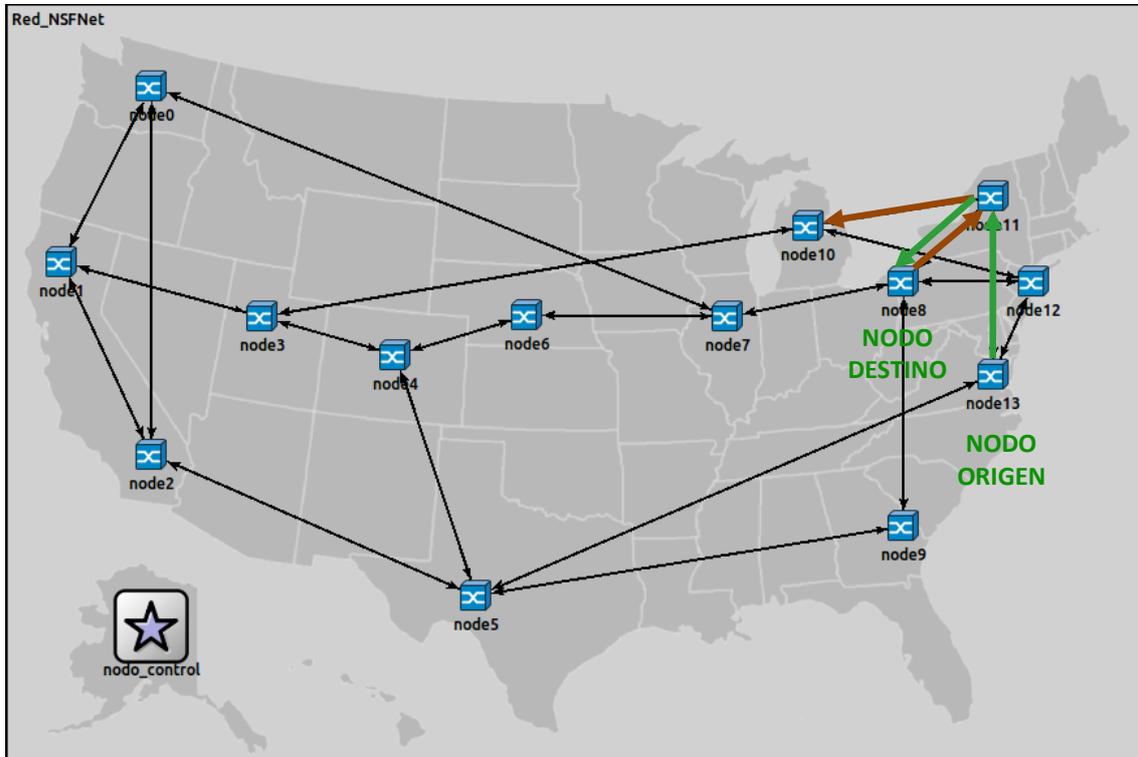


Figura 11. Establecimiento la segunda conexión en una red elástica óptica elástica con un solo formato de modulación.

<b>Ruta</b>	Nodo 13 (IP-OXC)– Nodo 11(OXC) – Nodo 8(OXC-IP)
<b>Slots ocupados</b>	1 slot QPSK (25 Gb/s)
<b>Fibras</b>	Fibras 40 (enlace 19) y 33 (enlace 15)

Tabla 13. Características principales de la segunda conexión establecida en el entorno de simulación.

### Coste por consumo de potencia

#### Transpondedores

Se establece un nuevo *lightpath* cuyo número de subportadoras es una, lo que implica que el total de subportadoras teniendo en cuenta lo anterior es dos, lo que hace necesario dos transpondedores, y como la modulación permanece a lo largo de la simulación siendo QPSK, la potencia será:

$$potencia_{\text{total}_{\text{transpondedores}}} [W] = 133,416 \cdot 2 = 266,832$$

### Amplificadores

Sumando el total de fibras que transmiten tráfico se puede ver que el número de fibras en total es de cuatro, pero en este caso hay que tener en cuenta un factor muy importante y es que las fibras que conectan el nodo 8 y el nodo 11 en distintas direcciones pertenecen a un mismo enlace.

$$potencia_{equipo\ amplificador\ enlace\ 15} [W] = 140 + 30 \cdot 2 = 200$$

$$potencia_{equipo\ amplificador\ enlaces\ 17\ y\ 19} [W] = 140 + 30 = 170$$

Con ello la potencia total es:

$$potencia_{total\ amplificadores} [W] = 170 \cdot 2 + 200 = 540$$

### Equipamiento OXC

El consumo de potencia dependerá de los parámetros  $\alpha$  y  $f$ .

- El nodo 8 está conectado con 8 fibras y además el número de *lightpaths* que se originan o terminan en dicho nodo es 1.

$$potencia_{WSS\ nodo\ 8} [W] = 8 \cdot 85 + 1 \cdot 100 + 150 = 930$$

- Los nodos 10 y 13 están conectados con 6 fibras unidireccionales y en dichos nodos comienza y termina un *lightpath*.

$$potencia_{WSS\ nodo\ 10/13} [W] = 6 \cdot 85 + 1 \cdot 100 + 150 = 760$$

- El nodo 11 está conectado con 6 fibras unidireccionales y en dicho nodo no comienza ni termina un *lightpath*.

$$potencia_{WSS\ nodo\ 11} [W] = 6 \cdot 85 + 0 \cdot 100 + 150 = 660$$

Con todo ello la potencia será:

$$potencia_{total\ WSS} [W] = 930 + 660 + 760 \cdot 2 = 3110$$

### Equipamiento IP

En este caso los nodos IP activos son el nodo 8, el nodo 10 y el nodo 13.

Procediendo a mirar la capacidad que atraviesa dichos nodos se puede ver como curiosamente por el nodo 8 comienza un *lightpath* y acaba otro, es por ello que mientras que para los nodos 10 y 13 la capacidad es 25 Gbps, para el nodo 8 la capacidad es 50 Gbps.

$$potencia_{equipo\ IP\ nodo\ 10/13} = 25 \cdot 10 = 250$$

$$potencia_{equipo\ IP\ nodo\ 8} = 50 \cdot 10 = 500$$

$$potencia_{total\ equipos\ IP} [W] = 250 \cdot 2 + 500 = 1000$$

La potencia total será:

$$potencia_{TOTAL}[W] = 540 + 1000 + 3110 + 266,832 = 4916,832$$

Siendo el coste correspondiente:

$$opex[u. c./h] = 5056,832 \cdot 0,0000205/1000 = 0,000101$$

## Coste por reparación sustitución

### Transpondedores

Debido a que el número de transpondedores activos es 2, si se combina con las unidades de coste de estos recursos, entonces:

$$\begin{aligned} opex_{transpondedor_{reparación+sustitución}} &= 36 + 0,1 = 36,1 \\ opex_{transpondedores_{reparación+sustitución}} [u. c./h] &= \frac{36,1 + 36,1}{350000} = 0,000206 \end{aligned}$$

### Amplificadores

El número de EDFAs activos es 4, y por ello junto con las unidades de coste, el resultado es:

$$\begin{aligned} coste_{EDFA_{reparación+sustitución}} [u. c.] &= 0,1 + 1 = 1,1 \\ opex_{amplificadores_{reparación+sustitución}} [u. c./h] &= \frac{1,1 + 1,1 + 1,1 + 1,1}{250000} = \frac{4,4}{250.000} \\ &= 0,0000176 \end{aligned}$$

### Equipamiento OXC

Calculando el número de WSS de los nodos activos. En este caso:

- El nodo 8 está conectado con 8 fibras unidireccionales.  
El máximo del número de *lightpaths* que se originan/terminan en dicho nodo es 1.

$$\text{Número WSS}_{nodo 8} [u. c.] = \left( 8 + 2 + 2 \cdot \left[ \left( \frac{9-9}{9} \right) \right] \right) = 10$$

- El nodo 11 está conectado con 6 fibras unidireccionales.  
En dicho nodo no comienza ni termina un *lightpath*.

$$\text{Número WSS}_{nodo 11} [u. c.] = \left( 6 + 2 + 2 \cdot \left[ \left( \frac{9-9}{9} \right) \right] \right) = 8$$

- Los nodos 10 y 13 están conectado con 6 fibras unidireccionales.  
El número de *lightpaths* que se originan o terminan en dicho nodo es 1.

$$\text{Número WSS}_{nodo 10} [u. c.] = \left( 6 + 2 + 2 \cdot \left[ \left( \frac{9-9}{9} \right) \right] \right) = 8$$

Sabiendo que las unidades de coste por WSS son 5, y por reparación 0,2, entonces:

$$\begin{aligned} opex_{WSS_{reparación+sustitución}} [u. c./h] &= \frac{(5,2 \cdot 10) + (5,2 \cdot 8) + (5,2 \cdot 8) + (5,2 \cdot 8)}{300000} \\ &= \frac{176,8}{300000} = 0,000589 \end{aligned}$$

### Equipamiento IP

Los nodos IP activos son tres, ya que el primer *lightpath* tiene como origen el mismo nodo que el segundo *lightpath* tiene como destino. En combinación con el coste:

$$puertos\ activos_{equipo\ IP\ nodo\ 10/13} = \left\lfloor \frac{25}{40} \right\rfloor = 1$$

$$puertos\ activos_{equipo\ IP\ nodo\ 8} = \left\lfloor \frac{50}{40} \right\rfloor = 2$$

$$coste_{puerto\ IP_{reparación+sustitución}} [u. c.] = 0,1 + 11,2284$$

$$\begin{aligned} opex_{puertos\ IP_{reparación+sustitución}} [u. c./h] \\ &= \frac{(11,3284) \cdot 1 + (11,3284) \cdot 1 + (11,3284) \cdot 2}{85000} = \frac{45,3136}{85000} \\ &= 0,0005331 \end{aligned}$$

Con todo ello el opex por reparación y sustitución es:

$$\begin{aligned} opex_{totales_{reparación+sustitución}} &= 0,000206 + 0,0000176 + 0,000589 + 0,0005331 \\ &= 0,0013457 \end{aligned}$$

### Coste total opex

$$opex_{total} [u. c./h] = 0,000101 + 0,0013457 = 0,0014467$$

### Consecutivas conexiones establecidas

Después de estas dos conexiones establecidas, se seguirán estableciendo nuevas conexiones. En este apartado se va a destacar la séptima conexión, cuya peculiaridad es que al contrario de sus anteriores conexiones, dicha conexión se multiplexa en varios *lightpaths*.

No se van a plantear los cálculos del modelo de costes, para no extender demasiado esta sección, pero se va a hacer un análisis del tráfico gestionado por cada nodo IP en el momento en que se establece la séptima conexión. Las conexiones establecidas, hasta el momento, se pueden ver en la Tabla 14.

Conexión	Nodos que atraviesa	Lightpaths
1º conexión	Nodo 8 (IP-OXC) – Nodo 11 (OXC) – Nodo 10 (OXC - IP)	Lightpath 0
2º conexión	Nodo 13 (IP-OXC) – Nodo 11 (OXC) – Nodo 8 (OXC - IP)	Lightpath 1
3º conexión	Nodo 8 (IP-OXC) – Nodo 9 (OXC - IP)	Lightpath 2



Con la combinación de los datos anteriores y las conexiones establecidas que se pueden ver en la Figura 12, se puede calcular el tráfico por nodo.

### **Nodo 0**

Debido a que la séptima conexión finaliza en dicho nodo:

$$\text{trafico gestionado}_{\text{nodo } 0} = 100 \text{ Gbps}$$

### **Nodo 1**

Ninguna conexión finaliza, comienza o atraviesa el nodo:

$$\text{trafico gestionado}_{\text{nodo } 1} = 0 \text{ Gbps}$$

### **Nodo 2**

La sexta conexión comienza en el nodo, por ello:

$$\text{trafico gestionado}_{\text{nodo } 2} = 25 \text{ Gbps}$$

### **Nodo 3**

Ya que la cuarta conexión tiene como nodo destino el nodo 3, el tráfico gestionado por dicho nodo es:

$$\text{trafico gestionado}_{\text{nodo } 3} = 100 \text{ Gbps}$$

### **Nodo 4**

Ninguna conexión finaliza, comienza o atraviesa el nodo:

$$\text{trafico gestionado}_{\text{nodo } 4} = 0 \text{ Gbps}$$

### **Nodo 5**

Ninguna conexión finaliza, comienza o atraviesa el nodo:

$$\text{trafico gestionado}_{\text{nodo } 5} = 0 \text{ Gbps}$$

### **Nodo 6**

Debido a que la cuarta conexión comienza en dicho nodo:

$$\text{trafico gestionado}_{\text{nodo } 6} = 100 \text{ Gbps}$$

### **Nodo 7**

Ninguna conexión finaliza, comienza o atraviesa el nodo:

$$\text{trafico gestionado}_{\text{nodo } 7} = 0 \text{ Gbps}$$

### **Nodo 8**

Así como la primera y tercera conexión comienzan en el nodo 8, la segunda, quinta y sexta conexión finalizan en él.

Particularmente los *lightpaths* que multiplexan la séptima conexión finalizan y terminan en dicho nodo.

En este punto hay que tener en cuenta que el nodo 8, nodo en el cual empieza y terminan los dos *lightpaths* de la séptima conexión, transmite el tráfico entrante a la salida. De esta manera el tráfico IP de dicho nodo se incrementará con el valor del tráfico que lo atraviesa.

$$\text{trafico gestionado}_{\text{nodo } 8} = 25 + 25 + 100 + 25 + 25 + 100 = 300 \text{ Gbps}$$

Como se puede comprobar cuando un nodo es el comienzo y final de un *lightpath* de la misma conexión el tráfico se suma solo una vez, ya que lo que hace es transmitirlo.

### **Nodo 9**

La tercera conexión finaliza en dicho nodo, por tanto:

$$\text{trafico gestionado}_{\text{nodo } 9} = 100 \text{ Gbps}$$

### **Nodo 10**

Debido a que la primera conexión finaliza en dicho nodo:

$$\text{trafico gestionado}_{\text{nodo } 10} = 25 \text{ Gbps}$$

### **Nodo 11**

Las conexiones quinta y séptima comienzan en el nodo 11, es por ello que:

$$\text{trafico gestionado}_{\text{nodo } 11} = 25 + 100 = 125 \text{ Gbps}$$

### **Nodo 12**

Ninguna conexión finaliza, comienza o atraviesa el nodo:

$$\text{trafico gestionado}_{\text{nodo } 12} = 0 \text{ Gbps}$$

### **Nodo 13**

Debido a que la segunda conexión comienza en dicho nodo:

$$\text{trafico gestionado}_{\text{nodo } 13} = 25 \text{ Gbps}$$

## **Costes por alquiler y mantenimiento**

Respecto al coste por alquiler y mantenimiento dado que es un cálculo que se realiza al final de la simulación para un valor de carga concreto, se va a pensar que el fin de la simulación será cuando se establezca la séptima conexión de la que se ha hablado en el apartado anterior.

Para entender el contexto de este apartado se va a mostrar el resultado de la tabla que surgiría al final de la simulación:

Nodo	Tráfico IP gestionado máximo	Número de WSS activos máximos	Número de transpondedores totales
0	100	8	60
1	0	0	60
2	25	8	60
3	100	8	60
4	0	8	60
5	0	10	60

<b>6</b>	100	6	60
<b>7</b>	0	8	60
<b>8</b>	300	10	60
<b>9</b>	100	6	60
<b>10</b>	25	8	60
<b>11</b>	125	8	60
<b>12</b>	0	0	60
<b>13</b>	25	8	60

Tabla 16. Tráfico IP, número de WSS activos y transpondedores máximos por nodo.

Con estos datos se calculará el coste por alquiler y mantenimiento:

### Slots de los transpondedores

Teniendo en cuenta que el número máximo de transpondedores es de 60 por nodo, y sabiendo que el número de slots por transpondedor es 1, entonces por nodo respecto a los transpondedores se tendrán 60 slots.

### Slots del equipamiento OXC

Aplicando la fórmula que establece que el número de slots por WSS es 2, se calculará el número de slots por nodo en la Tabla 17.

Número del nodo	Número de WSS	Slots por nodo
<b>0</b>	8	16
<b>1</b>	0	0
<b>2</b>	8	16
<b>3</b>	8	16
<b>4</b>	8	16
<b>5</b>	10	20
<b>6</b>	6	12
<b>7</b>	8	16
<b>8</b>	10	20
<b>9</b>	6	12
<b>10</b>	8	16
<b>11</b>	8	16
<b>12</b>	0	0
<b>13</b>	8	16

Tabla 17. Número de WSS y slots máximos por nodo.

**Slots del equipamiento IP**

En este caso los nodos IP, sabiendo el tráfico IP máximo por nodo, se puede calcular el número de puertos máximo. Aplicando los cálculos correspondientes el resultado se muestra en la Tabla 18.

Número del nodo	Tráfico IP máximo	Puertos activos	Slots por nodo
0	100	3	3
1	0	0	0
2	25	1	1
3	100	3	3
4	0	0	0
5	0	0	0
6	100	3	3
7	0	0	0
8	300	8	8
9	100	3	3
10	25	1	1
11	125	4	4
12	0	0	0
13	25	1	1

Tabla 18. Tráfico IP máximo, puertos activos y slots por equipamiento IP por nodo.

Con todos los datos anteriores se calcula el coste por alquiler y mantenimiento:

Número del nodo	Slots totales	Shelves	Racks	Metros cuadrados	Opex
0	79	5	2	1,284	0,0004815
1	60	4	1	0,642	0,00024075
2	77	5	2	1,284	0,0004815
3	79	5	2	1,284	0,0004815
4	76	5	2	1,284	0,0004815
5	80	5	2	1,284	0,0004815
6	75	5	2	1,284	0,0004815
7	76	5	2	1,284	0,0004815
8	88	6	2	1,284	0,0004815
9	75	5	2	1,284	0,0004815
10	77	5	2	1,284	0,0004815

<b>11</b>	80	5	2	1,284	0,0004815
<b>12</b>	60	4	1	0,642	0,00024075
<b>13</b>	77	5	2	1,284	0,0004815

Tabla 19. Coste por alquiler para los nodos de la red óptica elástica simulada.

Con todo ello el opex por alquiler y mantenimiento será:

$$\begin{aligned} \text{opex}_{\text{totalalquiler+mantenimiento}}[u. c/h] &= 12 \cdot 0,0004815 + 2 \cdot 0,00024075 \\ &= 0,0062595 \end{aligned}$$

### 3. Entorno de simulación con varios formatos de modulación

#### Aspectos previos a tener en cuenta

En la siguiente sección se van a realizar los cálculos de coste considerando que la red soporta varios formatos de modulación. En este caso se considera que las peticiones pueden solicitar estas tres capacidades: 25, 100 y 250 Gbps.

Partiendo de esta base y teniendo en cuenta los slots ocupados, y su relación con los formatos de modulación estudiados, es decir, el tráfico por slot para QPSK es 25 Gbps, para 16QAM es 50Gbps y para 64QAM es 75 Gbps, las posibles formas de satisfacer las demandas son:

Tráfico por conexión	Formas (más eficientes) de satisfacer las demandas		
<b>25 Gbps</b>	1 slot QPSK		
<b>100 Gbps</b>	4 slots QPSK	2 slots 16QAM	
<b>250 Gbps</b>	10 slots QPSK	5 slots 16QAM	3 slots 64QAM y 1 slot QPSK

Tabla 20. Número de slots de los diferentes formatos de modulación para los distintos tamaños de conexión.

#### Primera conexión establecida

Como se puede comprobar viendo la sección anterior, los costes son similares a los del establecimiento de la primera conexión para un solo formato de modulación. Dicha coincidencia radica en que el slot ocupado por la primera conexión tiene como formato de modulación QPSK y el estudio anterior se ha realizado para la misma. Es por ello que los cálculos se omitirán.

<b>Ruta</b>	Nodo 8 (IP-OXC)– Nodo 11 (OXC) – Nodo 10 (OXC-IP)
<b>Slots ocupados</b>	1 slot QPSK
<b>Fibras</b>	Fibra 26 (enlace 15) y 34 (enlace 17)

Tabla 21. Características principales de la primera conexión establecida en el entorno de simulación.

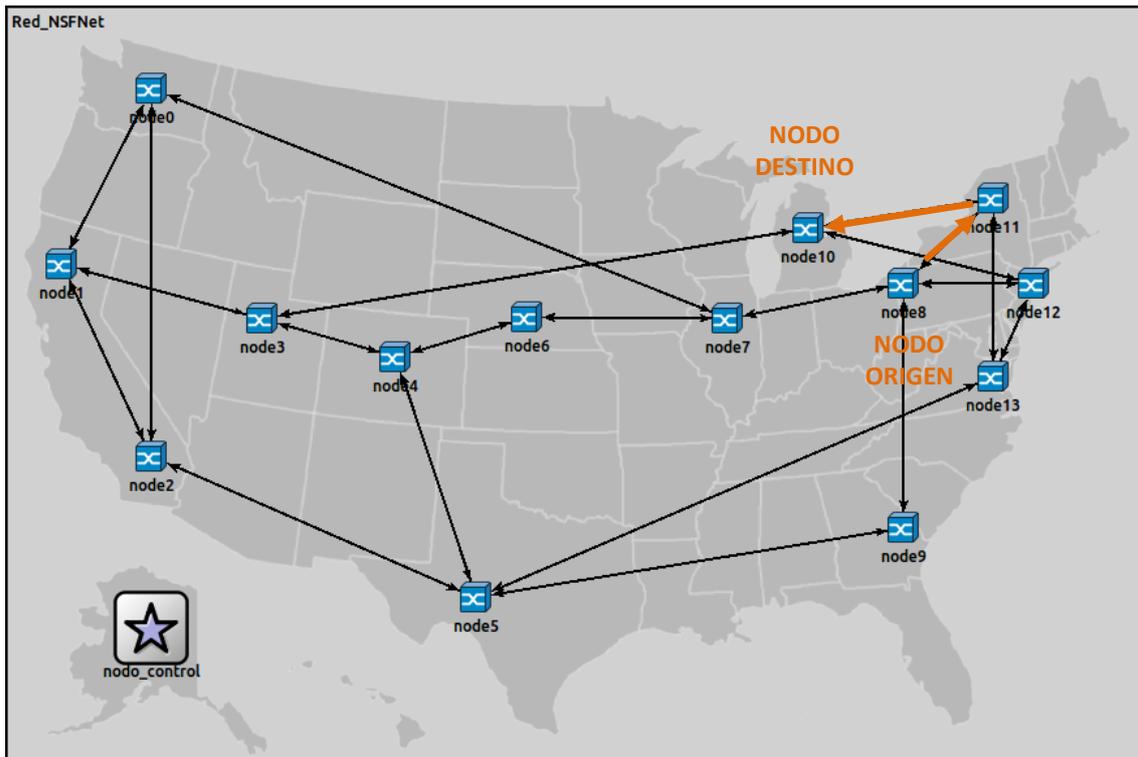


Figura 13. Establecimiento de la primera conexión en una red elástica óptica elástica con varios formatos de modulación.

### Segunda conexión establecida

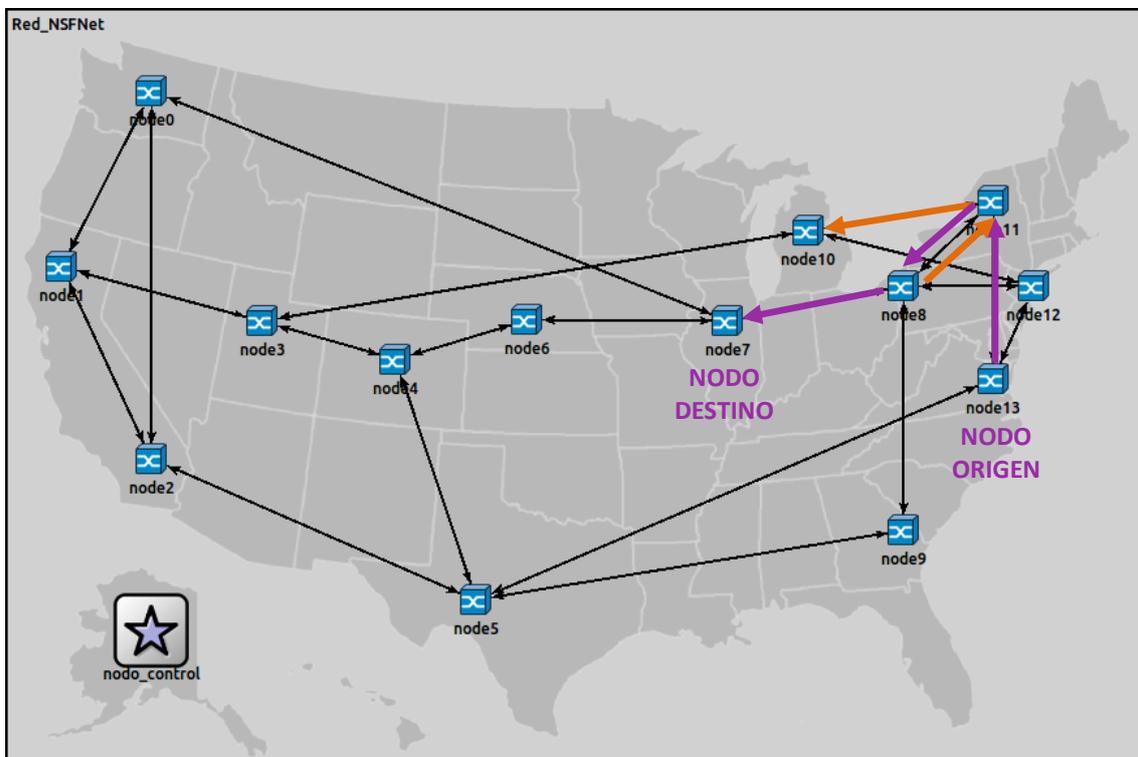


Figura 14. Establecimiento de la segunda conexión en una red elástica óptica elástica con varios formatos de modulación.

<b>Ruta</b>	Nodo 13 (IP-OXC) – Nodo 11(OXC) – Nodo 8 (OXC) – Nodo 7(OXC-IP)
<b>Slots ocupados</b>	1 slot QPSK
<b>Fibras</b>	Fibras 40 (enlace 19), 33 (enlace 15) y 24 (enlace 13)

Tabla 22. Características principales de la segunda conexión establecida en el entorno de simulación.

## Coste por consumo de potencia

### Transpondedores

En este caso debido a que existen dos *lightpaths*, se usarán dos transpondedores, cuyo número de subportadoras es 1 por cada *lightpath*.

$$potencia_{total_{transpondedores}} [W] = 133,416 \cdot 2 = 266,832$$

### Amplificadores

En este caso se tiene en total cinco fibras unidireccionales que transmiten tráfico, siendo dos de ellas pertenecientes a un mismo enlace.

Las fibras están numeradas como 40, 22 y 24.

$$potencia_{equipo\ amplificador_{enlace\ 15}} [W] = 140 + 30 \cdot 2 = 200$$

$$potencia_{equipo\ amplificador_{enlace\ 17/19/13}} [W] = 140 + 30 = 170$$

De manera que:

$$potencia_{total_{amplificadores}} [W] = 200 + 170 \cdot 3 = 710$$

### Equipamiento OXC

El consumo de potencia dependerá de los parámetros  $\alpha$  y  $f$ .

- El nodo 8 está conectado con 8 fibras y además el número de *lightpaths* que se originan o terminan en dicho nodo es 1.

$$potencia_{WSS_{nodo\ 8}} [W] = 8 \cdot 85 + 1 \cdot 100 + 150 = 930$$

- Los nodos 10, 13 y 7 están conectados con 6 fibras unidireccionales y en dichos nodos comienza y termina un *lightpath*.

$$potencia_{WSS_{nodo\ 10/13/7}} [W] = 6 \cdot 85 + 1 \cdot 100 + 150 = 760$$

- El nodo 11 está conectado con 6 fibras unidireccionales y en dicho nodo no comienza ni termina un *lightpath*.

$$potencia_{WSS_{nodo\ 11}} [W] = 6 \cdot 85 + 0 \cdot 100 + 150 = 660$$

Con todo ello la potencia será:

$$potencia_{totalWSS}[W] = 930 + 660 + 760 \cdot 3 = 3870$$

### Equipamiento IP

En el caso que se está abordando los nodos IP activos serán 8, 10, 13 y 7, y el tráfico que gestionan es 25 Gbps.

Es por ello que:

$$potencia_{equipo\ IP_{nodo\ 8/10/13/7}}[W] = 25 \cdot 10$$

$$potencia_{total\ equipos\ IP}[W] = 250 \cdot 4 = 1000$$

La potencia total será:

$$potencia_{TOTAL}[W] = 266,832 + 710 + 3870 + 1000 = 5846,832$$

Siendo el coste correspondiente:

$$opex[u.c./h] = 5846,832 \cdot 0,0000205/1000 = 0,00011986$$

## Coste por reparación sustitución

### Transpondedores

Debido a que el número de transpondedores activos es 2, ya que el número de *lightpaths* establecidos son 2. Junto con las unidades de coste de estos recursos:

$$\begin{aligned} opex_{transpondedor_{reparación+sustitución}} &= 36 + 0,1 = 36,1 \\ opex_{transpondedores_{reparación+sustitución}}[u.c./h] &= \frac{36,1 + 36,1}{350000} = 0,000206 \end{aligned}$$

### Amplificadores

Dado que el número de fibras que transmiten tráfico son 5, y ya que ninguna comparte el mismo enlace, entonces el resultado es:

$$\begin{aligned} coste_{EDFA_{reparación+sustitución}}[u.c.] &= 0,1 + 1 = 1,1 \\ opex_{amplificadores_{reparación+sustitución}}[u.c./h] &= \frac{1,1 + 1,1 + 1,1 + 1,1 + 1,1}{250000} = \frac{5,5}{250.000} \\ &= 0,000022 \end{aligned}$$

### Equipamiento OXC

Calculando el número de WSS de los nodos activos. En este caso:

- El nodo 8 está conectado con 8 fibras unidireccionales.  
El número de *lightpaths* que se originan en dicho nodo es 1.

$$\text{Número WSSs}_{\text{nodo } 8} [\text{u. c.}] = \left( 8 + 2 + 2 \cdot \left[ \left( \frac{9-9}{9} \right) \right] \right) = 10$$

- El nodo 11 está conectado con 6 fibras unidireccionales.  
En dicho nodo no comienza ni termina un *lightpath*.

$$\text{Número WSSs}_{\text{nodo } 11} [\text{u. c.}] = \left( 6 + 2 + 2 \cdot \left[ \left( \frac{9-9}{9} \right) \right] \right) = 8$$

- Los nodos 7, 10 y 13 están conectados con 6 fibras unidireccionales.  
El número de *lightpaths* que se originan o terminan en dicho nodo es 1.

$$\text{Número WSSs}_{\text{nodo } 10/7/13} [\text{u. c.}] = \left( 6 + 2 + 2 \cdot \left[ \left( \frac{9-9}{9} \right) \right] \right) = 8$$

Por tanto:

$$\text{Número WSSs}_{\text{total}} [\text{u. c.}] = 10 + 8 + 8 + 8 + 8 = 42$$

Sabiendo que las unidades de coste por WSS entonces:

$$\begin{aligned} \text{opex}_{\text{WSS}_{\text{reparación+sustitución}}} [\text{u. c./h}] &= \frac{(5,2 \cdot 10) + (5,2 \cdot 8) + (5,2 \cdot 8) + (5,2 \cdot 8) + (5,2 \cdot 8)}{300000} = \frac{218,4}{300000} \\ &= 0,000728 \end{aligned}$$

### Equipamiento IP

Los nodos IP activos son cuatro, ya que ese es el número de nodos en los que empieza o acaba un *lightpath*. Con lo que los puertos activos serán:

$$\begin{aligned} \text{puertos activos}_{\text{equipo IP nodo } 7/10/13} &= \left\lfloor \frac{25}{40} \right\rfloor = 1 \\ \text{puertos activos}_{\text{equipo IP nodo } 8} &= \left\lfloor \frac{50}{40} \right\rfloor = 2 \end{aligned}$$

Con las unidades de coste:

$$\text{coste}_{\text{puerto IP}_{\text{reparación+sustitución}}} [\text{u. c.}] = 0,1 + 11,2284$$

$$\begin{aligned} \text{opex}_{\text{puertos IP}_{\text{reparación+sustitución}}} [\text{u. c./h}] &= \frac{(11,3284) \cdot 1 + (11,3284) \cdot 1 + (11,3284) \cdot 1 + (11,3284) \cdot 2}{85000} \\ &= \frac{56,642}{85000} = 0,000666 \end{aligned}$$

Con todo ello el opex por reparación sustitución es:

$$\begin{aligned} \text{opex}_{\text{totales}_{\text{reparación+sustitución}}} [\text{u. c./h}] &= 0,000206 + 0,000022 + 0,000728 + 0,000666 = 0,001622 \end{aligned}$$

**Coste total opex**

$$opex_{total}[u.c./h] = 0,00011986 + 0,001676 = 0,001741$$

**Tercera conexión establecida**

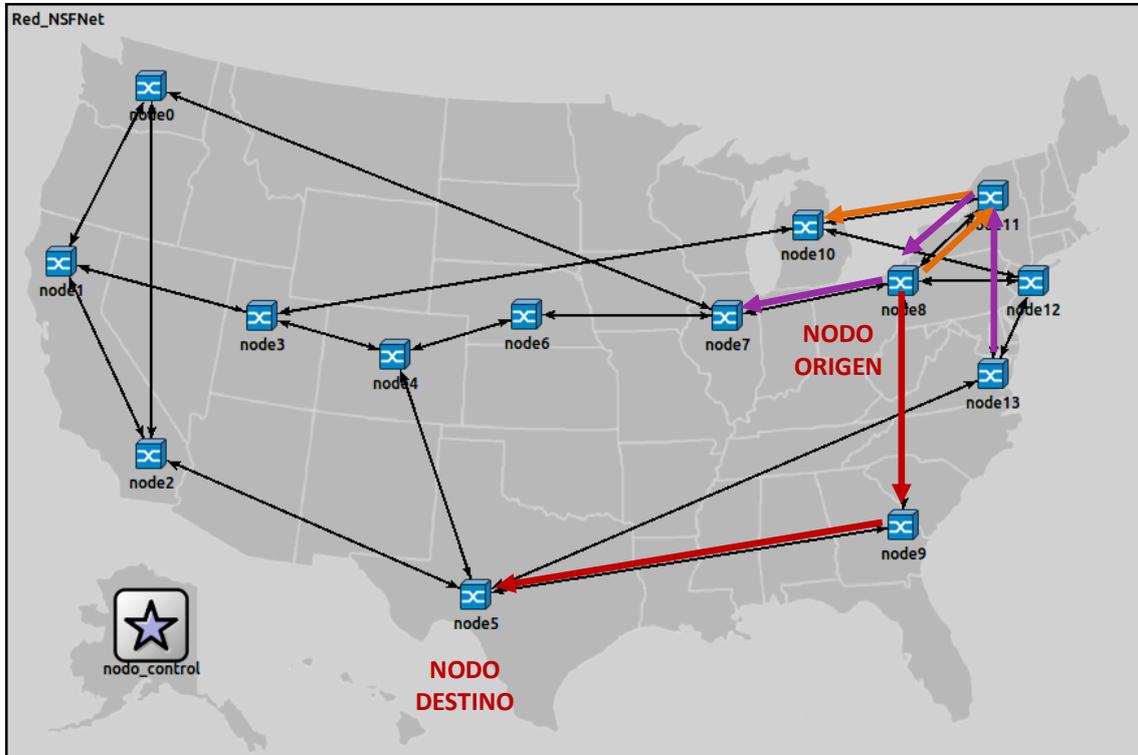


Figura 15. Establecimiento de la tercera conexión en una red elástica óptica elástica con varios formatos de modulación.

<b>Ruta</b>	Nodo 8 (IP-OXC) – Nodo 9(OXC) – Nodo 5(OXC-IP)
<b>Slots ocupados</b>	2 slots 16QAM
<b>Fibras</b>	Fibras 25 (enlace 14) y 29 (enlace 11)

Tabla 23. Características principales de la segunda conexión establecida en el entorno de simulación.

**Coste por consumo de potencia**

Transpondedores

Con el establecimiento de un nuevo *lightpath* existirán tres *lightpaths*, por lo que se usarán tres transpondedores.

Los dos primeros transpondedores transmiten *lightpaths* con una sola subportadora cuyo formato de modulación es QPSK.

Mientras que el nuevo *lightpath* transmitirá dos subportadoras 16QAM, lo que dará como resultado un tasa de 100 Gbps.

$$potencia_{transpondedor_{nodo\ 8}}[W] = 133,416 + 175,498 \cdot 2 = 484,412$$

$$potencia_{transpondedor_{nodo\ 13}} [W] = 133,416$$

$$potencia_{total_{transpondedores}} [W] = 484,412 + 133,416 = 617,828$$

### Amplificadores

Hay un total de siete fibras unidireccionales que transmiten tráfico, siendo dos de ellas pertenecientes a un mismo enlace.

Las nuevas fibras están numeradas como 25 y 29.

$$potencia_{equipo\ amplificador_{enlace\ 15}} [W] = 140 + 30 \cdot 2 = 200$$

$$potencia_{equipo\ amplificador_{enlace\ 17/19/13/14/11}} [W] = 140 + 30 = 170$$

De manera que:

$$potencia_{total_{amplificadores}} [W] = 200 + 170 \cdot 5 = 1050$$

### Equipamiento OXC

El consumo de potencia dependerá de los parámetros  $\alpha$  y  $f$ .

- El nodo 5 está conectado con 8 fibras unidireccionales.  
El número de *lightpaths* que se originan en dicho nodo es 1.

$$potencia_{WSS_{nodo\ 8}} [W] = 8 \cdot 85 + 1 \cdot 100 + 150 = 930$$

- El nodo 8 está conectado con 8 fibras y además el número de *lightpaths* que se originan o terminan en dicho nodo es 2.

$$potencia_{WSS_{nodo\ 8}} [W] = 8 \cdot 85 + 2 \cdot 100 + 150 = 1030$$

- Los nodos 10, 13 y 7 están conectados con 6 fibras unidireccionales y en dichos nodos comienza y termina un *lightpath*.

$$potencia_{WSS_{nodo\ 7/10/13}} [W] = 6 \cdot 85 + 1 \cdot 100 + 150 = 760$$

- El nodo 11 está conectado con 6 fibras unidireccionales y en dicho nodo no comienza ni termina un *lightpath*.

$$potencia_{WSS_{nodo\ 11}} [W] = 6 \cdot 85 + 0 \cdot 100 + 150 = 660$$

- El nodo 9 está conectado con 4 fibras unidireccionales y en dicho nodo no comienza ni termina un *lightpath*.

$$potencia_{WSS_{nodo\ 11}} [W] = 4 \cdot 85 + 0 \cdot 100 + 150 = 490$$

Con todo ello la potencia será:

$$potencia_{total_{WSS}} [W] = 930 + 1030 + 660 + 760 \cdot 3 + 490 = 5390$$

**Equipamiento IP**

Los nodos IP activos serán 8, 10, 13, 5 y 7.

La capacidad que transmite el nodo 13 es de 25 Gbps, por su parte los nodos 5 y 7 transmiten 100 Gbps, mientras que el nodo 8 dado que es el origen de dos *lightpaths*, transmite 125 Gbps.

Es por ello que:

$$potencia_{equipo\ IP_{nodo\ 13}}[W] = 50 \cdot 2 \cdot 10 = 1000$$

$$potencia_{equipo\ IP_{nodo\ 10,13,7}}[W] = 25 \cdot 10 = 250$$

$$potencia_{equipo\ IP_{nodo\ 8}}[W] = 25 \cdot 10 + 50 \cdot 2 \cdot 10 = 1250$$

$$potencia_{total\ equipos\ IP}[W] = 250 + 250 + 250 + 1250 + 1000 = 3000$$

La potencia total será:

$$potencia_{TOTAL}[W] = 617,828 + 1050 + 5390 + 3000 = 10057,828$$

Siendo el coste correspondiente:

$$opex[u. c.] = 10057,828 \cdot 0,0000205/1000 = 0,00020619$$

**Coste por reparación sustitución****Transpondedores**

Siendo el número de transpondedores activos es 3, entonces:

$$opex_{transpondedor_{reparación+sustitución}} = 36 + 0,1 = 36,1$$

$$opex_{transpondedores_{reparación+sustitución}}[u. c./h] = \frac{36,1 + 36,1 + 36,1}{350000} = 0,000309$$

**Amplificadores**

El número de EDFAs activos es 7, esto es así porque el número de fibras activas es 7. Con ello el resultado es:

$$coste_{EDFA_{reparación+sustitución}}[u. c.] = 0,1 + 1 = 1,1$$

$$opex_{amplificadores_{reparación+sustitución}}[u. c./h] = \frac{1,1 \cdot 7}{250000} = 0,0000308$$

**Equipamiento OXC**

Calculando el número de WSS de los nodos activos. En este caso:

- Los nodos 8 y 5 están conectados con 8 fibras unidireccionales.

El número de *lightpaths* que se originan en dichos nodos son 2 y 1 respectivamente.

$$\text{Número WSSs}_{\text{nodo } 8/5} [\text{u. c.}] = \left( 8 + 2 + 2 \cdot \left[ \left( \frac{9-9}{9} \right) \right] \right) = 10$$

- Los nodos 11 y 9 está conectado con 6 y 4 fibras unidireccionales respectivamente.

En dichos nodos no comienzan ni terminan ningún *lightpath*.

$$\text{Número WSSs}_{\text{nodo } 11} [\text{u. c.}] = \left( 6 + 2 + 2 \cdot \left[ \left( \frac{9-9}{9} \right) \right] \right) = 8$$

$$\text{Número WSSs}_{\text{nodo } 9} [\text{u. c.}] = \left( 4 + 2 + 2 \cdot \left[ \left( \frac{9-9}{9} \right) \right] \right) = 6$$

- Los nodos 7, 10 y 13 están conectado con 6 fibras unidireccionales. El número de *lightpaths* que se originan o terminan en dicho nodo es 1.

$$\text{Número WSSs}_{\text{nodo } 7/10/13} [\text{u. c.}] = \left( 6 + 2 + 2 \cdot \left[ \left( \frac{9-9}{9} \right) \right] \right) = 8$$

Por tanto:

$$\text{Número WSSs}_{\text{total}} [\text{u. c.}] = 10 + 10 + 8 + 8 + 8 + 8 + 6 = 58$$

Sabiendo que las unidades de coste por WSS son 5, y por fallo de equipo 0,2, entonces:

$$\text{coste}_{\text{WSS}_{\text{reparación+sustitución}}} [\text{u. c.}] = 0,2 + 5 = 5,2$$

$$\begin{aligned} \text{opex}_{\text{WSS}_{\text{reparación+sustitución}}} [\text{u. c./h}] &= \frac{(5,2 \cdot 10) \cdot 2 + (5,2 \cdot 8) \cdot 4 + (5,2 \cdot 6) \cdot 2}{300000} \\ &= \frac{332,8}{300000} = 0,00110933 \end{aligned}$$

### **Equipamiento IP**

Los nodos IP activos son cinco, ya que el primer *lightpath* tiene como origen el mismo nodo que el segundo *lightpath* tiene como destino.

Los puertos activos son:

$$\text{puertos activos}_{\text{equipo IP nodo } 8} = \left\lceil \frac{125}{40} \right\rceil = 4$$

$$\text{puertos activos}_{\text{equipo IP nodo } 5} = \left\lceil \frac{100}{40} \right\rceil = 3$$

$$\text{puertos activos}_{\text{equipo IP nodo } 10/13/7} = \left\lceil \frac{25}{40} \right\rceil = 1$$

En combinación con las unidades de coste:

$$\text{coste}_{\text{puerto IP}_{\text{reparación+sustitución}}} [\text{u. c.}] = 0,1 + 11.2284$$

$$\begin{aligned} \text{opex}_{\text{puertos IP}_{\text{reparación+sustitución}}} [\text{u. c./h}] &= \frac{(0,1 + 11.2284) \cdot 10}{85000} = \frac{113,284}{85000} \\ &= 0,00133 \end{aligned}$$

Con todo ello el opex por reparación sustitución es:

$$\begin{aligned} \text{opex}_{\text{totales}_{\text{reparación+sustitución}}} [\text{u. c./h}] \\ = 0,000309 + 0,0000308 + 0,00110933 + 0,00133 = 0,00277 \end{aligned}$$

### Costes por alquiler y mantenimiento

Debido a que los costes de alquiler y mantenimiento ya se han explicado para el caso de un solo formato de modulación, y el razonamiento es similar en ambos casos, se va a omitir el desarrollo de esta parte.

Lo único a tener en cuenta es que el tráfico máximo por nodo, esta vez estaría afectado por los distintos formatos de modulación.

## Capítulo VI

---

# Estudio tecno-económico de una red con un solo formato de modulación

El simulador en el que se basa este trabajo, pretende evaluar el coste de una misma red cuando se aplican distintas políticas de *grooming* para un mismo formato de modulación.

A continuación se van a presentar los análisis numéricos tras realizar las simulaciones correspondientes para el formato de modulación QPSK.

### 1. Aspectos previos

Hay que tener en cuenta que en base al Proyecto Fin de Carrera de Jesús Javier de Castro Bravo [1] del cual se extiende este Trabajo Fin de Grado y sobretodo del 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).

Ahora bien, para mantener la compatibilidad (en la mayor medida posible) con el modelo de costes, el tamaño de slot es de 12,5 GHz (requerido por el modelo de costes para su aplicación) frente a 5 GHz (lo supuesto en el artículo de Zhang et al. [3]).

Eso se traduce en:

- El espectro total disponible en la red óptica (medido en GHz) es mayor en este estudio que en el de Zhang et al.,
- El tráfico total en Gbit/s que trata la red para una determinada carga en Erlangs es mayor en este estudio que en el de Zhang et al.

Además hay que recordar que en [1] no se dimensionó la red a nivel de equipamiento IP y OXC (pero sí a nivel de amplificadores y transpondedores), esto supone que los costes por alquiler y mantenimiento se calcularán con el método alternativo propuesto en el capítulo anterior, evitando así este dimensionamiento previo.

Debido a la falta de dimensionamiento de la red únicamente se mostrarán los resultados para el opex pero no de capex.

### 2. Primer estudio: Estudio del impacto de las simulaciones sin limitación de distancia

#### Número medio de Transpondedores activos vs Carga de la red

Para un análisis de la simulación tanto económico como tecnológico, se han realizado estudios tanto para el medio ideal y real, para QPSK. En este caso se va a tratar el

primer caso, lo cual supone que no hay limitación de la distancia de las conexiones ópticas.

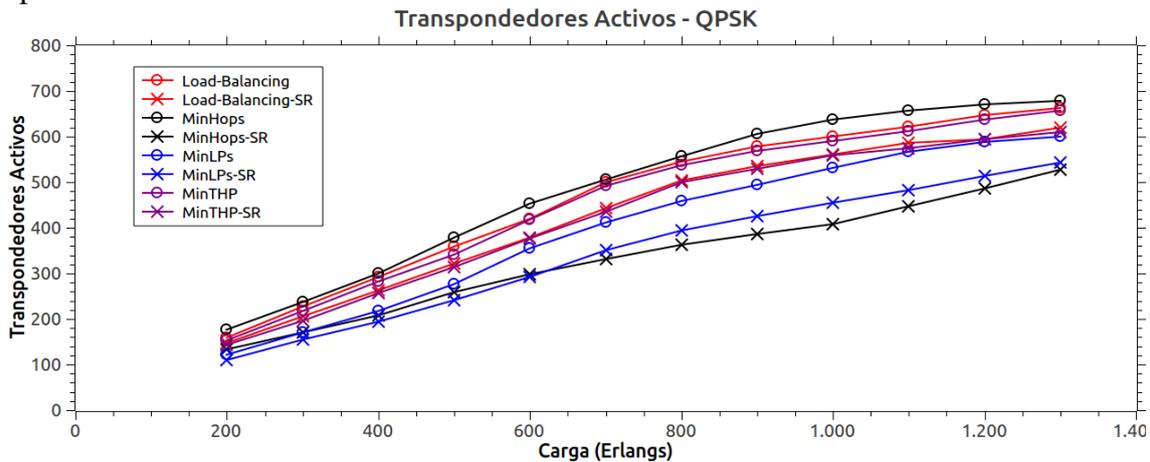


Figura 16. Número medio de transpondedores activos al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK suponiendo un medio físico ideal.

Analizando la Figura 16 se puede ver como a medida que aumenta la carga aumenta el número de transpondedores activos.

Haciendo una mayor profundización en las políticas que no aplican el esquema de reserva de espectro, se puede observar como MinLPs es la política que menor uso hace de los transpondedores. Razonablemente esto es lógico dado que este tipo de política trata de minimizar el número de *lightpaths* establecidos en la red, y dado el compromiso tan fuerte entre *lightpaths* y transpondedores, esta minimización afecta de manera directamente proporcional a este tipo de equipamiento.

Al aplicar el esquema de reserva de espectro los resultados mejoran notablemente en cada política por separado. Hay que recordar que dicho esquema reserva la cantidad de espectro por transpondedor activo para aprovechar al máximo su capacidad y se puedan establecer conexiones posteriormente. Esto se resume en que posteriormente al establecimiento de la conexión se podrán multiplexar más conexiones en un mismo *lightpath*, lo cual evita la creación de uno nuevo y como consecuencia el uso de un nuevo transpondedor.

Dentro de las políticas con este tipo de reserva activa, para una carga inferior a 600 (cargas bajas) la política que menor número de transpondedores usa es MinLPs, debido a ese mínimo uso de *lightpaths* explicado, pero para una carga superior a 600 MinHops hace uso de un número mínimo pero muy similar a los valores de MinLPs.

Respecto a MinHops se puede ver que produce una mejora mucho mayor que en el resto de casos, lo cual tiene sentido ya que esta política trata de minimizar el número de saltos por conexión, o lo que es lo mismo, se pretende establecer cada conexión en un nuevo *lightpath* que vaya directamente entre el nodo origen y el nodo destino. Es por ello que al poder reutilizar *lightpaths* que tengan las características deseadas se reduce considerablemente el número de ellos y por lo tanto de *lightpaths*.

En cualquier caso, lo principal es subrayar que estos resultados son coherentes con los obtenidos en [1] y [3]. Verificar dicho punto era el principal objetivo de representar esta gráfica.

A nivel de opex (en lo que se profundizará más adelante) una mayor utilización de los transpondedores supone un mayor coste por consumo de potencia, así como costes por reparación sustitución ya que este coste se ha supuesto que se aplica a los dispositivos activos.

Si se observa más adelante la Figura 22 se puede ver que el mayor coste no corresponde con las políticas de mayor uso de transpondedores, por tanto se puede razonar que el coste por equipo transpondedor no produce la mayor influencia en el modelo de costes planteado.

### **Tasa de Bloqueo de ancho de banda (BBR) vs Carga de la red.**

En este caso se va a estudiar la probabilidad de bloqueo en las redes elásticas bajo las condiciones impuestas, y como se puede ver en la Figura 17 las políticas Load-Balancing-SR y MinTHP-SR son las que menor BBR tienen en la red. En el primer caso el motivo es que la finalidad del diseño de dicha política era obtener la menor probabilidad de bloqueo, encaminando las nuevas conexiones a través de las fibras con cargas más ligeras.

Respecto a las políticas con y sin reserva de espectro, las primeras debido a que los *lightpaths* no usan la totalidad de su capacidad supone que sean las que mejor rendimiento tienen.

De nuevo, los resultados son coherentes con [1] y con [3]. Simplemente mencionar que la simulación se ha detenido antes que este parámetro converja (ya que no era el objetivo principal de este trabajo al ya haber obtenido correctamente esta figura en [1]).

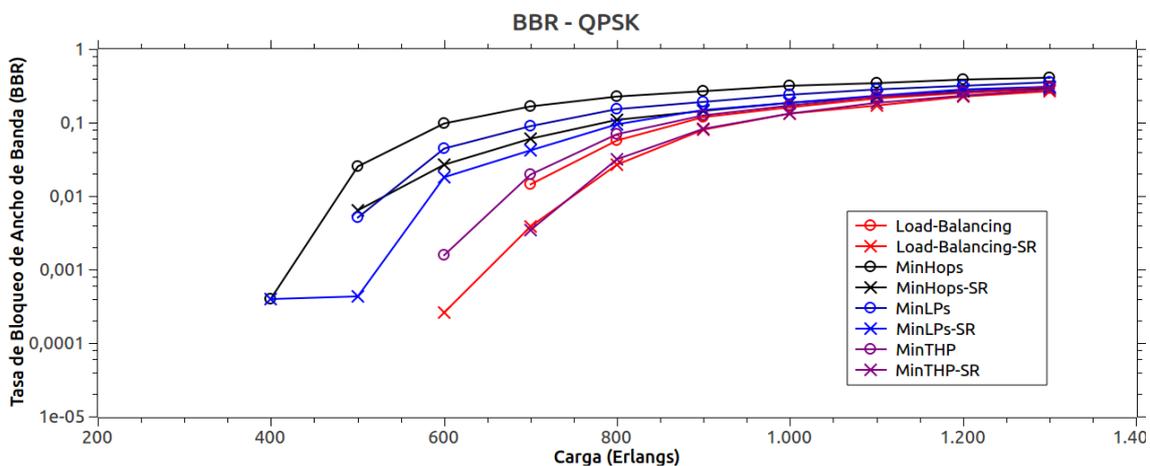


Figura 17. Tasa de bloqueo de ancho de banda (BBR) al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK suponiendo un medio físico ideal.

En comparación con la Figura 22 en la que se muestra el opex, se puede ver como las políticas con menor bloqueo son las que tienen un mayor coste de opex y viceversa.

De cara al coste se puede pensar que debido a que se produce un mayor bloqueo de las peticiones, habrá menos dispositivos activos lo cual produce un menor coste por consumo de potencia y de reparación-sustitución.

### Número medio de saltos en la topología física por conexión eléctrica vs Carga de la red

Tanto MinTHP-SR como Load-Balancing-SR son las políticas que proporcionan una menor probabilidad de bloqueo y que a su vez obtienen un número medio de saltos en la topología física menor que para el resto de casos.

En este sentido se puede obtener una relación directa, ya que las políticas anteriores consiguen una menor BBR debido a que Load-Balancing encamina las conexiones por fibras menos cargadas y MinTHP intenta utilizar el menor número de fibras posible, y esto supone un menor número de saltos en la topología física

En caso contrario se puede ver la política MinLPs-SR dado que pretende una mayor reutilización de los *lightpaths*, aunque estos vayan por más fibras y recorran múltiples saltos físicos por la red antes que establecer nuevos *lightpaths*.

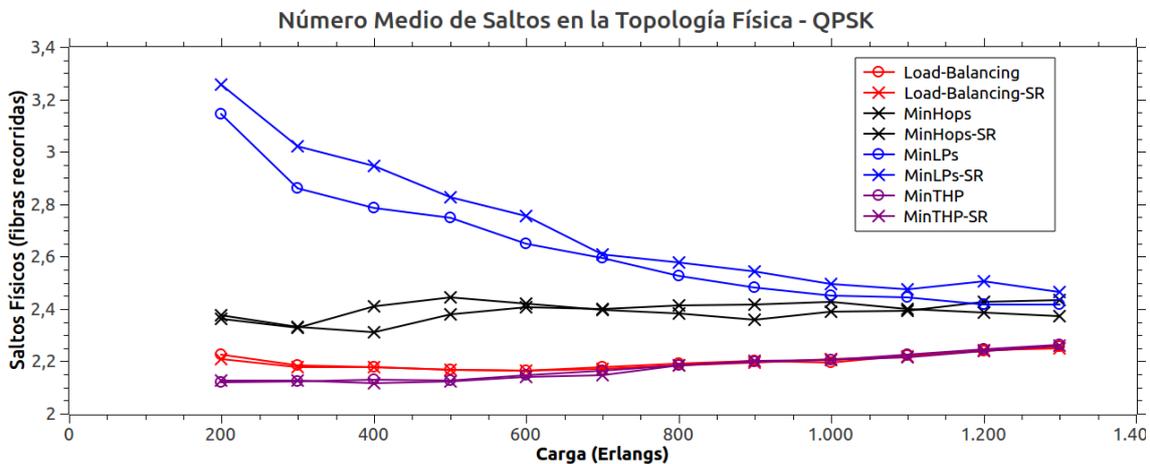


Figura 18. Número medio de saltos en la topología física al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK suponiendo un medio físico ideal.

A nivel de opex el uso de un número de fibras tiene una relación directa con el coste por amplificador ya que habrá menos amplificadores activos y ello supone un menor coste tanto de consumo de potencia como de reparación-sustitución.

### Número medio de saltos en la topología virtual por conexión eléctrica vs Carga de la red

Bajo la política MinHops las conexiones se establecen con el menor número de saltos posibles, lo cual da lugar a un menor número de saltos virtuales, es decir, a que una conexión eléctrica atravesase menos *lightpaths*.

Por el contrario tanto Load-Balancing como MinTHP dado que las conexiones atraviesan un mayor número de *lightpaths* el número de saltos virtuales será mayor.

Respecto al opex un mayor número de *lightpaths* en la red supone un mayor número tanto de transpondedores activos como de nodos IP/MPLS utilizados ya que se hace necesaria la conversión de la capa óptica a la capa IP. Esto se traduce en un mayor coste de alquiler y mantenimiento y puede ser la razón por la cual Load-Balancing y MinTHP son las políticas que mayor opex presenta en la Figura 22.

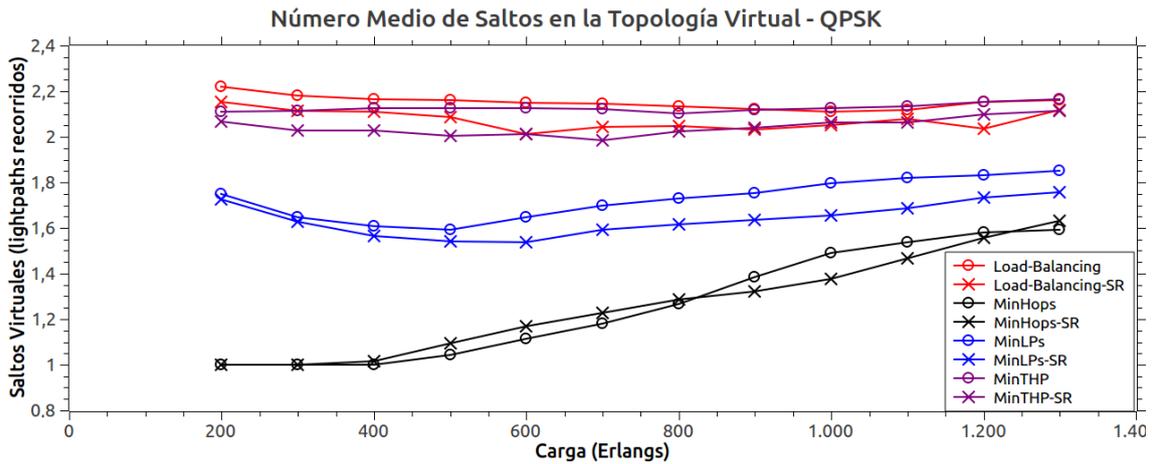


Figura 19. Número de saltos en la topología virtual al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK suponiendo un medio físico ideal.

**Número máximo de puertos IP activos totales vs Carga de la red**

Un parámetro interesante es el número total máximo de puertos activos. Como ya se ha comentado anteriormente, no se ha realizado un dimensionamiento previo de la red, pero sí se ha ido registrando a lo largo de la simulación cuál es el número máximo de puertos IP que estaban activos en algún momento en cada uno de los nodos de la red. Evidentemente este procedimiento tiene limitaciones pero da una idea del impacto de los distintos algoritmos en el número de puertos con los que se debería equipar a cada nodo. Por simplificar (aún más), en este apartado se va a sumar el número máximo de puertos activos en todos los nodos de la red y se representará frente a la carga en función de los diferentes algoritmos.

Como se puede ver en la Figura 20, el número de puertos activos que puede alcanzar la red es muy elevado. Tomando como coste de sustitución de un puerto IP de 11,2284 u.c., es razonable que el perfil de la figura sea muy similar al de la Figura 22 ya que este coste supondría una gran influencia en el coste total.

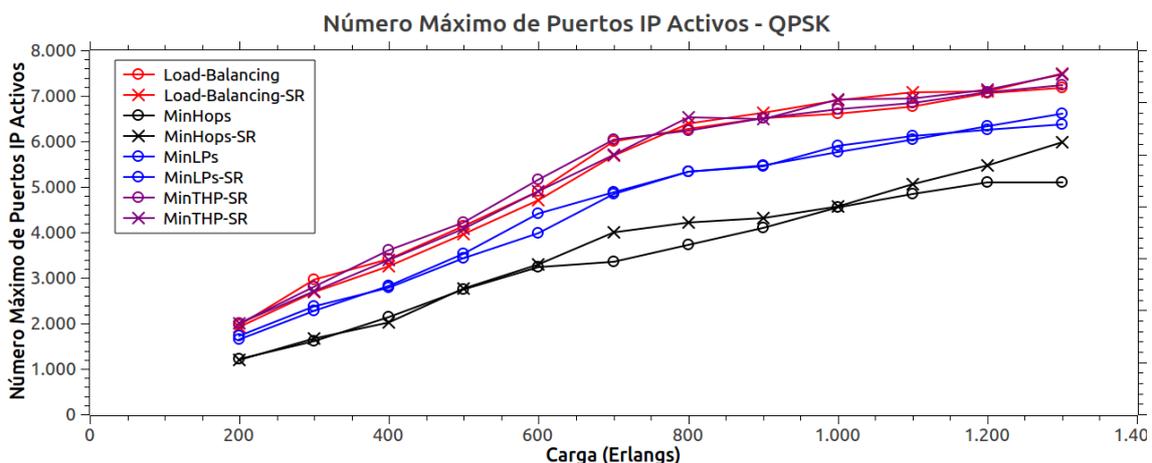


Figura 20. Número máximo de puertos activos IP al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK suponiendo un medio físico ideal.

Haciendo un análisis de las políticas, Load-Balancing y MinTHP tanto en sus formas con y sin reserva de espectro presentan un número total de puertos activos superior al resto de algoritmos. Del mismo modo que se ha razonado anteriormente, el que estas

políticas hagan uso de un mayor número de *lightpaths* supone un mayor rendimiento de la capa IP y por ende, de los puertos IP.

### Número máximo de WSSs totales vs Carga de la red

De modo análogo a la sección anterior, se va a sumar el número máximo de WSSs activos en todos los OXC de la red y se representará ese valor frente a la carga en función de los diferentes algoritmos.

En la Figura 21 se puede ver como MinHops es la que mayor número de WSSs presenta, esto es así ya este tipo de política pretende establecer un nuevo *lightpath* cada vez que se establece una nueva conexión, esto influye de manera directa en los nodos OXCs, ya que si se prefiere un menor número de saltos virtuales esto puede llevar a que los *lightpaths* que tengan una menor distancia entre origen y destino ya estén utilizados y se tengan que establecer *lightpaths* con una mayor distancia entre el origen y el destino y por tanto, a que se atravesase un mayor número de nodos OXC.

Cuando se activa el esquema de reserva de espectro ya que se pueden reutilizar en mayor medida los *lightpaths* y por ende, se pueden usar aquellos que proporcionen una menor distancia entre origen y destino, esto da lugar a un menor uso de los nodos OXCs.

Respecto al resto de políticas MinTHP y Load-Balancing son superiores en uso de los WSSs, lo cual tiene sentido ya que estas políticas usan un gran número de *lightpaths*, lo cual supone un mayor número de puertos IP y de WSSs.

A nivel de opex, un mayor uso de WSSs se va a ver reflejado en el incremento tanto en el opex.

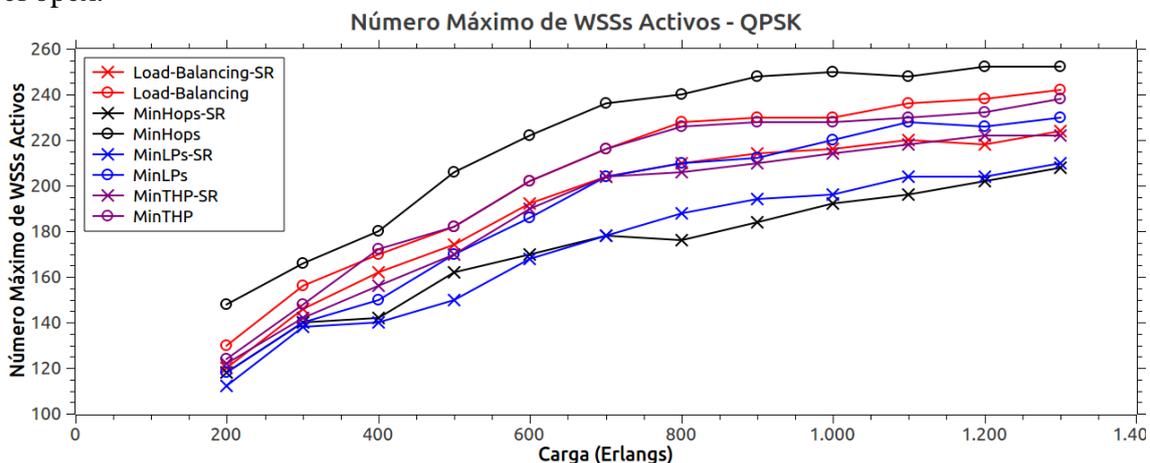


Figura 21. Número máximo de WSSs totales activos IP al emplear diversas estrategias de tráfico grooming dinámico utilizando la modulación QPSK suponiendo un medio físico ideal.

### Conclusiones respecto al opex

Como se observa en la Figura 20 el número de puertos IP en la red es muy elevado. Al dividir entre el número de nodos en la red (14), se obtiene que el número de puertos IP por nodo está (en media) entre 70 y 560, es decir, muy por encima de los valores contemplados en el modelo de coste de partida (suponía nodos de entre 4 y 64 puertos). Por esa razón y para analizar la sensibilidad del opex al coste por puerto IP, se va a

realizar dos análisis. El primero supondrá el valor por puerto descrito en el Capítulo III (11,8824 u.c), y el segundo reduciendo dicho valor considerablemente (dividiéndolo por 25), ya que una segunda lectura de [9] parece sugerir que ese valor puede encajar mejor con el resto de costes considerados en el estudio (y extraídos de otros trabajos).

*Opex con valor por puerto IP de 11,8824*

La Figura 22 muestra opex total al emplear diversas estrategias de traffic grooming. Lo primero que se va a analizar de dicha figura es la influencia del esquema de reserva de espectro.

Con los datos anteriores se puede concluir que el esquema de reserva de espectro mejora los beneficios tecnológicos. Respecto al opex se puede ver como en algunos casos sí que presenta una mejora como en el caso de MinLPs, pero en otros casos el cambio no es significativo. Lo cual hace indicar que este esquema de reserva es de gran interés ya que no provoca el aumento del opex y además produce un mejor rendimiento de la red.

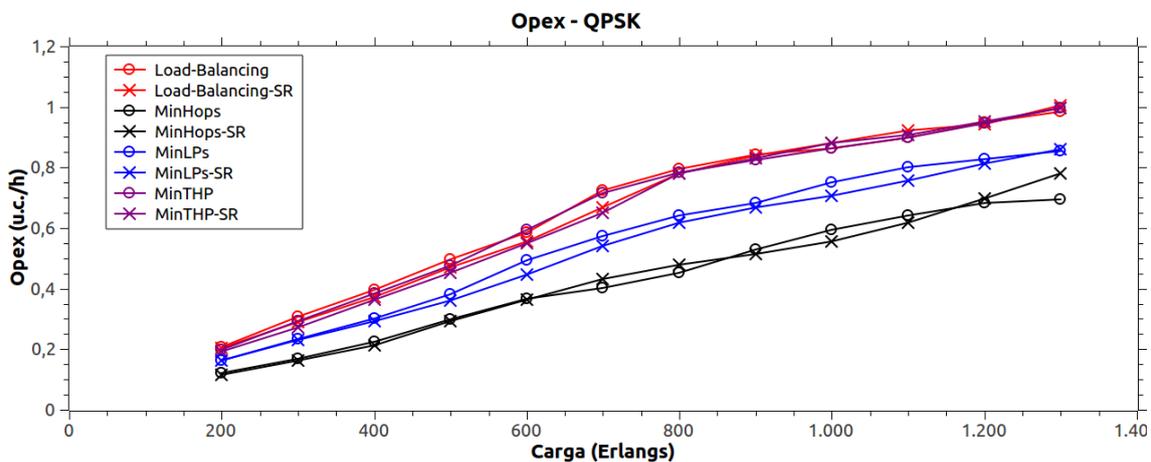


Figura 22. Opex total al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK suponiendo un medio físico ideal. Valor por puerto IP = 11,2284.

Respecto a las políticas se puede ver como Load-Balancing y MinTHP son las que mayor opex presentan, esto es así dado que las conexiones atraviesan un mayor número de *lightpaths* aumentando el coste por consumo de potencia y reparación-sustitución por transpondedores y nodos IP activos.

Respecto al coste por equipamiento OXC, dado que dependen del número de *lightpaths* que empiezan o terminan en un nodo, un aumento considerable crecerá las posibilidades de que se aumente el grado lógico y consecuentemente la potencia por OXC y el número de WSSs.

Con todo ello si se da una mayor importancia a la probabilidad de bloqueo, se deberá plantear el compromiso entre opex y BBR. O bien elegir una alternativa intermedia que será MinLPs con esquema de reserva de espectro, cuyo coste y BBR se encuentran en un valor intermedio entre los extremos. Relacionado con este compromiso hay un aspecto que no se ha considerado y es el de las ganancias que se obtienen por conexión. MinHops implica menor opex pero mayor BBR y por tanto menos ingresos. Load Balancing implica mayores opex pero menor BBR y por tanto más ingresos. Sería necesario completar el estudio con un modelo para los ingresos por conexión de modo

que se pueda ver qué algoritmo es el más adecuado desde un punto de vista tecno-económico.

Finalmente la mejor manera sería el uso de una red dinámica respecto a las políticas de *grooming*, de manera que para cada conexión se elegiría la mejor opción para la finalidad de dicha conexión.

#### Opex con valor por puerto IP de 0,4491

Realizando un análisis del opex con un cambio por coste de puerto IP, que hay que recordar que era uno de los parámetros más influenciados a la hora de realizar el cálculo del opex, se puede ver como el opex reduce considerablemente.

Aún así los razonamientos expuestos para la gráfica de opex con el modelo propuesto en este trabajo siguen siendo válidos, ya que como se puede comprobar tanto en la Figura 22 como en la Figura 23 MinHops sigue siendo la política con un menor coste, y Load-Balancing y MinTHP siguen siendo las de mayor coste.

La diferencia más significativa se presenta en MinLPs cuyo valor de opex aumenta considerablemente, lo cual se puede deber a que ahora que los puertos IP no tienen tanta influencia el resto de equipamiento se vuelven más importantes, de tal manera que dado que esta política pretende hacer un máximo uso de los transpondedores, puede ser que el coste por transpondedor se vuelva superior. Además el coste de MinHops también aumenta con respecto a MinHops-SR haciéndose similar al de MinLPs-SR.

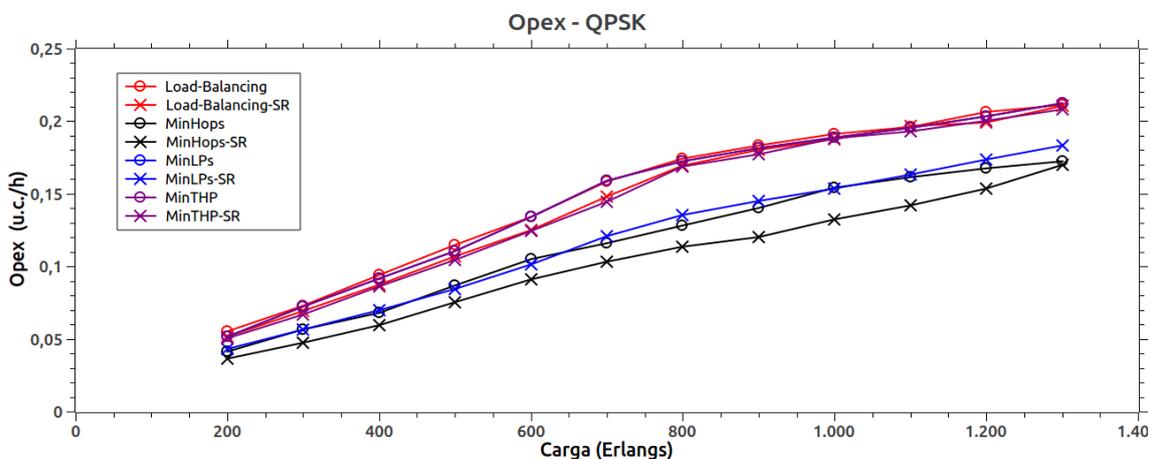


Figura 23. Opex total al emplear diversas estrategias de tráfico grooming dinámico utilizando la modulación QPSK suponiendo un medio físico ideal. Valor por puerto IP = 0,4491.

De igual manera que en el caso anterior, la mejor política sería una política dinámica respecto a las políticas de *grooming*.

### 3. Segundo estudio: Estudio del impacto de las simulaciones con limitación de distancia

En principio, para QPSK el hecho de que se active la limitación a distancia no va a realizar ningún cambio significativo en los resultados que se van a poder ver en las figuras: Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 27, Figura 28 y Figura 29.

**Número medio de Transpondedores activos vs Carga de la red**

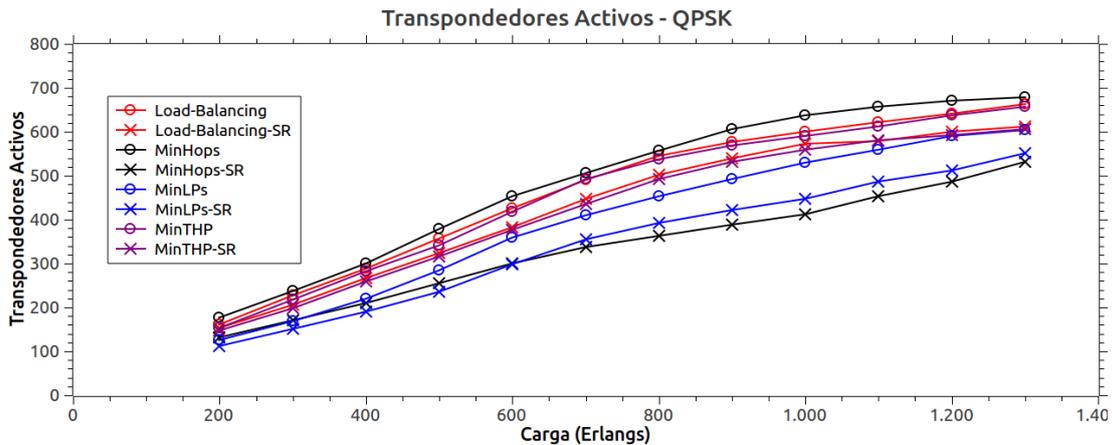


Figura 24. Número medio de transpondedores activos al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK, suponiendo un medio físico real.

**Tasa de Bloqueo de ancho de banda (BBR) vs Carga de la red.**

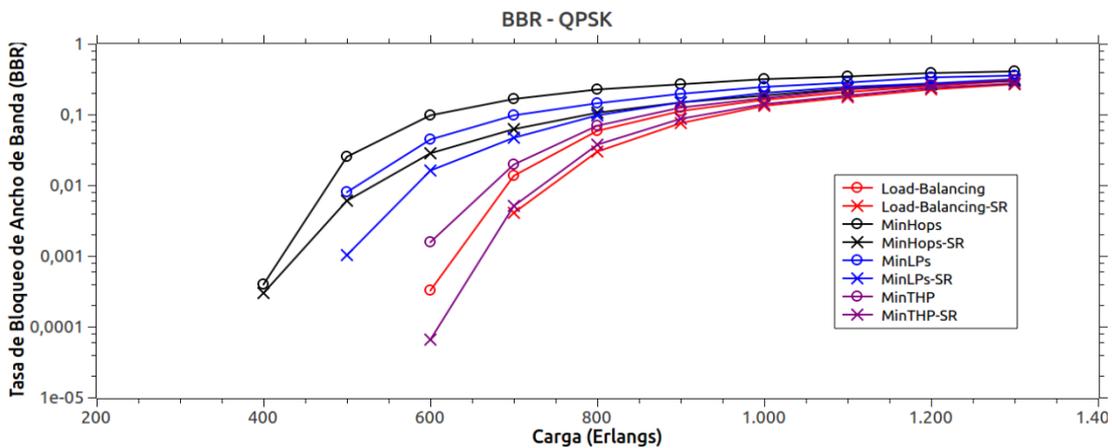


Figura 25. Tasa de bloqueo de ancho de banda (BBR) al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK, suponiendo un medio físico real.

**Número medio de saltos en la topología física por conexión eléctrica vs Carga de la red**

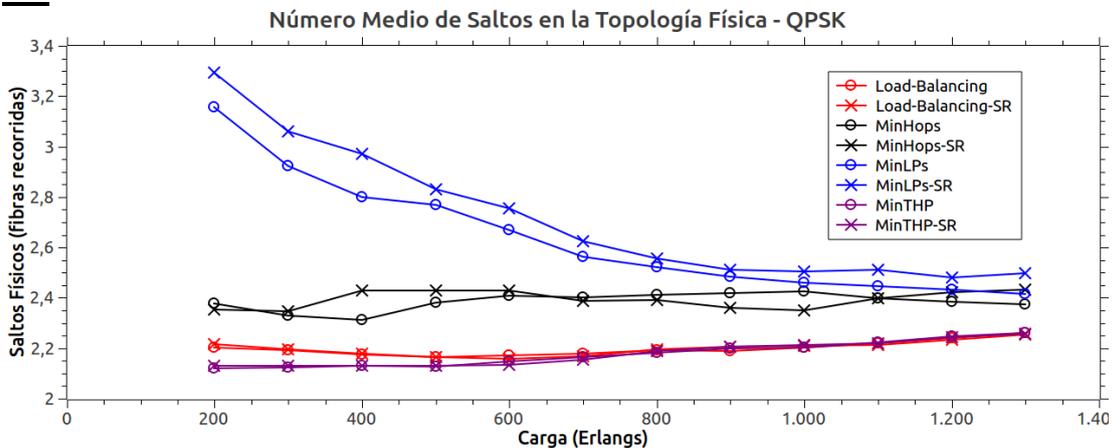


Figura 26. Número medio de saltos en la topología física al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK, suponiendo un medio físico real.

**Número medio de saltos en la topología virtual por conexión eléctrica vs Carga de la red**

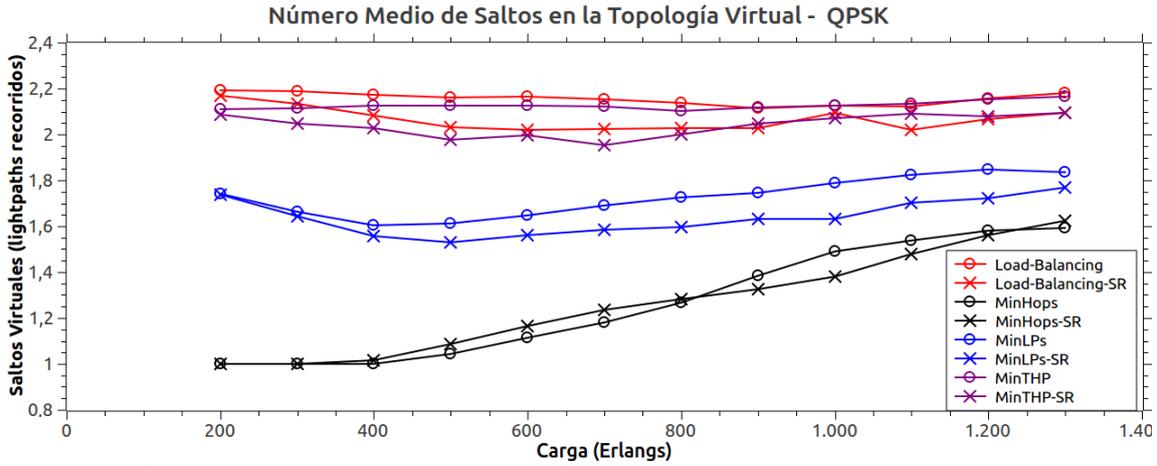


Figura 27. Número medio de saltos en la topología virtual al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK, suponiendo un medio físico real.

**Opex**

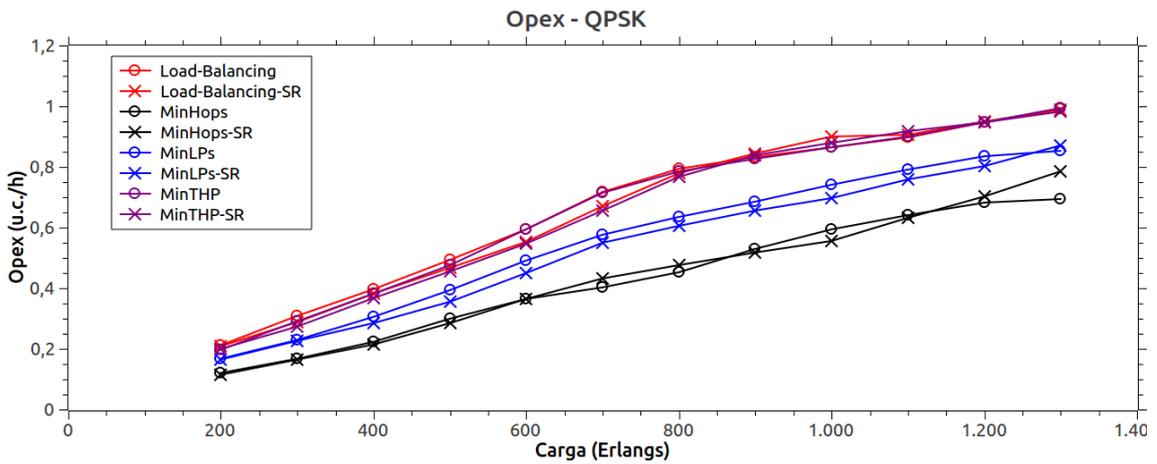


Figura 28. Opex total al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK, suponiendo un medio físico real. Valor por puerto IP = 11,2284.

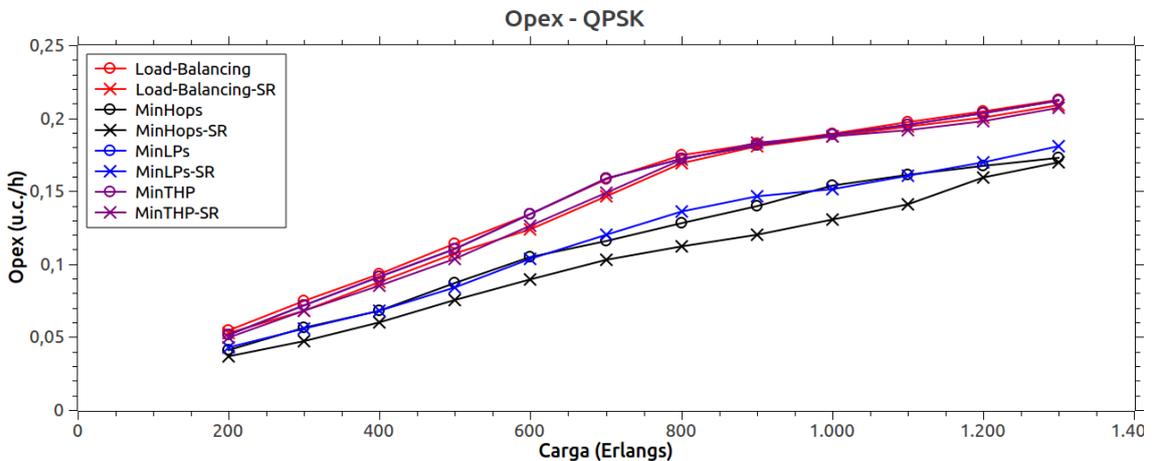


Figura 29. Opex total al emplear diversas estrategias de traffic grooming dinámico utilizando la modulación QPSK, suponiendo un medio físico real. Valor por puerto IP = 0,4491.

---

## Capítulo VII

---

### 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 III. 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. Además, se han considerado 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.

Los resultados descritos en el Capítulo VI muestran la gran influencia de las distintas políticas de *grooming* a nivel de 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 punto de partida para estudios más profundos e incluso puede servir como herramienta de apoyo para dimensionar la red y luego analizar los costes operativos asociados.

Algunas líneas futuras que se plantean son:

- Repetir el análisis realizado en este trabajo pero sin dimensionar a priori el número de transpondedores (de modo análogo a como se ha hecho con los puertos IP y WSSs).
- Analizar el opex cuando se emplean modulaciones 16QAM y 64QAM individualmente y en combinación con QPSK (el simulador ya está preparado para ello).
- 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.
- Repetir el análisis disminuyendo el número de slots frecuenciales disponibles de modo que el espectro total disponible sea el mismo que en [3] (pues en [3] se consideran slots de 5 GHz y en este trabajo de 12,5 GHz). Esto lleva como consecuencia que el tráfico total que podrá cursar la red (en Gbit/s) será más bajo que el obtenido en este estudio y por tanto el dimensionado de los nodos a nivel de puertos IP dará valores más realistas que los que se han obtenido.
- Realizar simulaciones donde las peticiones sean de conexiones bidireccionales. Para una petición de conexión entre A y B, se calculará una ruta y se reservarán los recursos necesarios, y además se usará exactamente la misma secuencia de nodos y los recursos equivalentes para establecer también la conexión en el sentido contrario. De esta forma el cálculo del número de transpondedores será exacto. Por cada conexión (óptica) bidireccional se utilizará un transpondedor completo (transmisor y receptor) en el nodo origen y otro en el destino de dicha conexión bidireccional.
- Considerar un modelo más realista de ubicación de amplificadores en la red. En este trabajo se ha considerado un amplificador por enlace pero sería más realista considerar al menos la longitud del enlace y colocar uno cada 80 o 100 km aproximadamente.

- Otra alternativa sería mejorar el modelo para los nodos OXC por los que no pasa ningún *lightpath* en los que en este estudio ha considerado que no consumen potencia, y en realidad sí que la consumen (al menos 150W).
- Establecer un mecanismo para dimensionar la red determinando, por ejemplo, el número de puertos IP y de WSSs necesarios en cada nodo de la red para garantizar una determinada probabilidad de bloqueo máxima a una cierta carga.
- 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*.
- Realizar el estudio considerando la red dimensionada, de modo que exista un límite en el equipamiento disponible en cada nodo que habrá que considerar a la hora de gestionar las peticiones, de forma que, por ejemplo, una conexión no pueda establecerse aunque haya espectro disponible si un nodo OXC o un nodo IP no tiene recursos disponibles.
- Completar el estudio con un modelo para los ingresos por conexión cursada con éxito de modo que se pueda ver qué algoritmo es el más adecuado desde un punto de vista tecno-económico, es decir, que permita evaluar el compromiso entre opex y probabilidad de bloqueo de ancho de banda antes mencionado.

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++

Para la optimización del simulador se han realizado tres funciones adicionales, las cuales están creadas de tal manera que poseen una gran portabilidad y adaptación respecto a otro tipo de escenarios:

- *calculo\_opex()*

Dicha función realiza el cálculo del modelo de costes de la red óptica elástica simulada.

Dentro de dicha función ahora mismo se implementa tanto el capex como el opex, pudiendo ser validado mediante los cálculos realizados en el capítulo VII. Una optimización a realizar como línea futura es dividir el cálculo en dos funciones.

- *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()*

Debido a que la red no está dimensionada respecto al equipamiento IP y OXC 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 3.

#### 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].

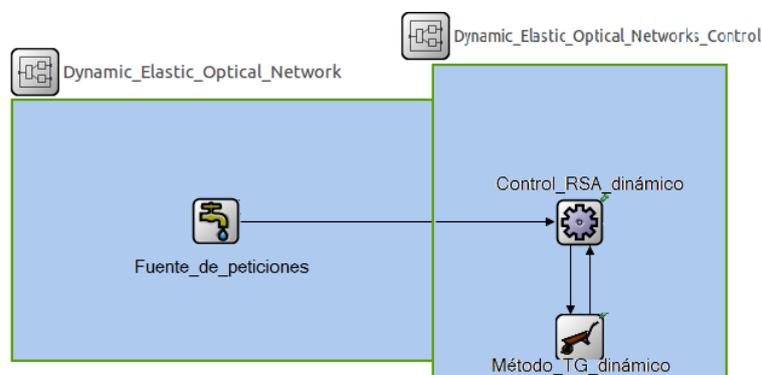


Figura 30. Resumen del intercambio de mensajes entre módulos.

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 Dijkstra el camino más corto define que la conexión se encaminará por *lightpaths* establecidos en la red, entonces el mensaje contendrá la información sobre los dichos *lightpaths*, pasándose su identificador, así como la información relativa a la asignación de espectro. Por el contrario si al aplicar Dijkstra el camino más corto 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 autoprograma 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. 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_vector_t ruta;
};
```

Profundizando 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.
- **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 tres dimensiones de la tabla corresponden con el origen, el destino, y la tercera por el hecho de que entre un mismo origen y destino puede haber más de una conexión eléctrica establecida al mismo tiempo:

$$\text{tabla\_electrical\_LSP}[\text{origen}][\text{destino}][i]$$

- ***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;
    simtime_t tiempo_establecimiento;
    int_vector_t fibras;
    int_vector_t conexiones;
};

```

Profundizando 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.
- **Fibras:** Especifica las fibras que recorrerá la conexión eléctrica 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.
- **Tiempo establecimiento:** Almacena el tiempo de establecimiento del *lightpath*.

Respecto a la tabla “*tabla\_lightpaths*” es una tabla unidimensional, utilizada 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_vector_t fibras;
};
```

Profundizando 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. Por el momento mediante el modulo 'Estado' se establece que hay un amplificador por 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 los parámetros:

- **Identificador del modulo origen, del modulo 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 activacion;
};
```

Profundizando 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.

### 3. 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 un nuevo transpondedor 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, ya que no se realizará ninguna modificación a nivel de reparación y sustitución.

- *Lighpaths* nuevos y ya establecidos, de manera que 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 dependerá de la tabla de *lightpaths*, mediante la cual se pueden realizar los cálculos de opex pertenecientes a los transpondedores.

Para el cálculo del coste por consumo de potencia para la simulación con un solo formato de modulación (que es el caso implementado en este trabajo), sabiendo el tipo de formato de modulación y el número de subportadoras por conexión (afortunadamente ambos parámetros se obtienen a lo largo del código de manera directa) se podrá aplicar la fórmula del cálculo de transpondedores directamente.

Debido a que el cálculo 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 *lightpaths*.

Respecto al coste por reparación y sustitución, basta con saber el número de *lightpaths* mediante dicha tabla, 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 *lightpaths* (que dice que fibras atraviesan cada *lightpath*).

El coste por consumo de potencia dependerá de los parámetros mencionados y de su aplicación en las fórmulas del modelo de costes.

Respecto al coste por reparación-sustitución se podrá obtener sabiendo el número de nodos activos, este parámetro se obtendrá mediante la tabla de fibras activas, ya que si una fibra transmite tráfico, tanto el nodo origen como el nodo destino enviarán o recibirán dicho tráfico.

## 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 *lightpaths* (que dirá qué fibras que 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 el número de nodos activos que se haya calculado previamente.

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

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

- Tráfico IP máximo.
- Número máximo de WSS activos en la red.
- Transpondedores máximos.

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 máximo de transpondedores, lo cual se puede obtener sabiendo el número de nodos así como el número de transpondedores totales por nodo (activos o no).

Todo ello no es más que la aplicación de un mero cálculo numérico para emplear las fórmulas estudiadas ya que el número máximo de transpondedores esta dimensionado a sesenta.

$$slots_{transpondedores_{nodo}} = 60 \quad (3.1)$$

##### Nodos OXCs

Respecto al equipamiento OXC, será necesario el cálculo del número máximo de WSS slots por nodo, lo cual se obtendrá combinando las fórmulas para obtener dicho número y la tabla obtenida.

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

##### 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.

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

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

#### 5. Función “*calculo\_media\_ponderada*”

La finalidad de estudio tecno-económico es ver la evolución del opex respecto a la carga de la red, el número medio de transpondedores activos, la tasa de bloqueo de ancho de banda (BBR), el número medio de saltos en la topología física por conexión eléctrica y el número medio de saltos en la topología virtual por conexión eléctrica

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.

## 6. 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 avanza a grandes pasos se pueden adaptar mediante pequeñas modificaciones en el código, en su mayor parte numéricas.



## Bibliografía

---

- [1] Jesús Javier de 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 Optican Communication (ECIC'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>