



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Nicolás Alexander Carvajal Guzmán

Dimensionamiento en redes ópticas flexibles

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Electrónico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 14 de septiembre de 2018



Dimensionamiento en Redes Ópticas Flexibles

Nicolás Alexander Carvajal Guzmán

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Facultad de Ingeniería de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Ariel Leiva L.

Profesor Guía

Sra. Alejandra Beghelli

Segundo Revisor

Sr. Sebastian Fingerhuth

Secretario Académico

Valparaíso, 14 de septiembre de 2018

Dedicado a todos aquellos que me han acompañado, ya sea de manera directa o indirecta en este largo trayecto, en especial a mi familia y a Dios por mantener vivo este sueño

Agradecimientos

Me gustaría agradecer de manera especial a mi familia, incluyendo amigos cercanos y conocidos que estuvieron en algún momento de este trayecto, apoyando de manera incondicional durante los años de preparación en mi carrera. También agradezco a cada uno de los profesores que me brindaron su experiencia y dedicación en cada una de las asignaturas, especialmente a mi profesor guía, por brindarme tanto el conocimiento como las herramientas para desarrollar y concluir de la mejor forma este proyecto de título.

Valparaíso, 14 de septiembre de 2018

Nicolás A. Carvajal G.

Resumen

Este proyecto tiene como finalidad solucionar el problema de dimensionamiento en redes ópticas flexibles en modo de operación dinámica.

Para ello se propone una forma de dimensionamiento en base a minimizar el uso de dispositivos de transmisión y recepción (transpondedores) en pos de cumplir una probabilidad de bloqueo umbral mientras que se contabiliza el uso del espectro (FSUs). Esto es evaluado a través de escenarios a variados formato de modulación presentes en la literatura, y velocidades de transmisión digital con probabilidades de ocurrencia que dependen del estado temporal en que se encuentre la red (corto, mediano y largo plazo).

Mediante el uso de un simulador de eventos discretos, programado en C++, se simula el dimensionamiento del algoritmo RSA secuencial 3SP-FF. Los resultados muestran que en el corto plazo el algoritmo RSA utilizado se mantiene dentro de la banda C con todos los formatos de modulación que se analizaron (desde 64QAM hasta BPSK) en todo el rango de cargas de tráfico. Por otro lado en el mediano plazo BPSK y QAM sobrepasan la banda C sobre una carga de tráfico de 0.1 y 0.8 respectivamente. Finalmente en el largo plazo tanto BPSK, QPSK y 8QAM sobrepasan la banda C sobre una carga de tráfico de 0.01, 0.2 y 0.6 respectivamente. Tanto el formato de modulación 16QAM, 32QAM y 64QAM no sobrepasan la banda C, tanto en corto, mediano y largo plazo, en todo el rango de cargas de tráfico.

Como conclusión, se recomienda que para suplir toda la demanda de tráfico hasta el largo plazo es necesario usar multifibras con 8 fibras ópticas unidireccionales entre pares de nodos para BPSK (formato de modulación más robusto). Otra posibilidad es limitar las peticiones de alto *bit rate* (como el caso de 1000Gbps que es 2.45 veces mayor que una de 400Gbps en cuanto a utilización de FSUs), o bien el uso de EDFA que permita extenderse sobre la banda C.

Los resultados de este proyecto de título son de interés para los operadores de redes ópticas, quienes deben decidir el número de transpondedores y espectro dedicado para mantener una red óptica flexible con establecimiento dinámico de conexiones.

Palabras claves: Dimensionamiento, algoritmos RMLSA, dinámico, transpondedores, FSU.

Abstract

This project is aimed at finding the solution of dimensioning in flexible optical networks in dynamic operation mode.

In order to do so, it is proposed a form of dimensioning based in minimizing the usage of transmission and reception devices (transponders) to accomplish a probability of threshold blockage while accounting the usage of the spectrum (FSUs). This is evaluated through scenarios of several formats of modulation introduced in the literature, and digital transmission speeds with probability of occurrence that depends on the temporal state in which the network is (short, medium and long term).

Through the usage of a discrete events simulator, programmed via C++, it is simulated the dimensioning of the 3SP-FF sequential RSA algorithm. The results show that in the short term the RSA algorithm utilized stays in the bounds of the C band with all the modulation formats that were analyzed (between 64 QAM to BPSK) in all the traffic loads ranges. On the other hand, in the medium term, both, BPSK and QAM overpass the C band on a load of a traffic of 0.1 and 0.8 respectively. Finally, in the long term all of them BPSK, QPSK and 8QAM overpass the C band on a traffic load of 0.01, 0.2 and 0.6 respectively. The 16QAM, 32QAM and 64QAM modulation format do not overpass the C band, not in short, medium, nor long term, in all of the traffic loads ranges.

As a conclusion, it is recommended that in order to supply all the requirements of traffic until the coming of the long term, it is necessary the usage of multi fiber with 8 one directional optic fibers between pairs of nodes for Binary phase shift keying (BPSK, more robust format modulation). Another possibility is to limit the petitions of high bitrate (as in the case of 1000gbps that is 2.45 times larger than a 400gbps one, regarding the usage of FSU's), or, the utilization of the Erbium doped fiber amplifier (EDFA) that allows to surpass the C band.

The results of this project of degree are of interest for the optic networks operators, which have to decide the number of transponders and spectrum dedicated to maintain an elastic optic network with dynamic connections.

Key words: Dimensioning, RSA Algorithms, Dynamic, Transponders, FSU.

Índice general

Introducción.....	1
Objetivos generales.....	3
Objetivos específicos	3
1 Redes Ópticas	5
1.1 Introducción.....	5
1.2 Redes DWDM	5
1.3 Redes DWDM según tipo de operación	6
1.3.1 Redes DWDM estáticas	6
1.3.2 Redes DWDM dinámicas	7
1.4 Redes ópticas según el tipo de asignación de espectro	8
1.4.1 Grilla Fija	8
1.4.2 Grilla Flexible	8
1.5 Problemática redes DWDM	9
1.5.1 Migración a redes flexibles	9
1.5.2 Comparación entre grillas	10
1.6 Dispositivos de una red óptica Flexible	10
1.6.1 Transpondedor flexible (BVT)	10
1.6.2 Transpondedor flexible <i>sliceable</i> (SBVT)	11
1.6.3 Conmutador selector de longitud de onda (WSS)	11
1.6.4 Nodos elásticos o flexibles	12
1.7 Algoritmos RMLSA.....	13
1.7.1 <i>Frequency Slot Unit</i> (FSU).....	13
1.7.2 Restricciones en algoritmos RMLSA	14
1.7.3 Algoritmos RMLSA secuenciales	15
1.7.4 Algoritmo de asignación de ruta (RA)	15
1.7.5 Algoritmos de asignación de formato de modulación (MLA)	16
1.7.6 Algoritmo de asignación de espectro (SA)	16
1.7.7 Causas de bloqueo en algoritmos RMLSA (Probabilidad de bloqueo)	17
1.8 Dimensionamiento.....	17
1.9 Pregunta de investigación	18

2 Simulador de la red.....	19
2.1 Simulador.	19
2.2 Probabilidad de bloqueo (Pb)	20
2.3 Modelo de Tráfico y Carga de Tráfico	21
3 Metodo de Dimensionamiento basado en el simulador de eventos discretos 22	
3.1 Descripción general.....	22
3.2 Definición del procedimiento.....	22
3.3 Limitación del metodo	24
4 Resultados y análisis de simulación	26
4.1 Topología de red utilizada.....	26
4.2 Cantidad de peticiones de conexión	27
4.3 Capacidad de la red	27
4.3.1 Cantidad de FSUs en cada enlace de la red.....	27
4.3.2 Número de transpondedores	27
4.4 Probabilidad de bloqueo umbral (Po).....	27
4.5 Velocidades de transmisión digital disponibles.....	28
4.6 Consideraciones del algoritmo RSA y requerimientos de espectro	28
4.7 Factor de reducción	33
4.8 Escenarios de simulación.....	35
4.9 Resultados dimensionamiento según el formato de modulación.....	36
4.9.1 Resultados a 64QAM	36
4.9.2 Resultados a 32QAM	37
4.9.3 Resultados a 16QAM	37
4.9.4 Resultados a 8QAM	37
4.9.5 Resultados a QPSK.....	37
4.9.6 Resultados a BPSK	38
4.10 Resultados Dimensionamiento por Transpondedores	41
4.11 Comparación de resultados del dimensionamiento	42
5 Conclusiones	45
Bibliografía	48

Introducción

Las grandes demandas de tráfico mundial y nacional se hacen a través de redes ópticas, dado que son capaces de transportar amplios volúmenes de información a través de una misma fibra [1]. Los servicios de comunicaciones ofrecidos por proveedores de servicios del área de telecomunicaciones se han expandido rápidamente en los últimos años, pues el interés del cliente no sólo está en telefonía de voz, televisión y radio, sino que en la actualidad los requerimientos se han expandido a un internet más rápido y constante, video de alta calidad, transferencia rápida de archivos, juegos en línea en alta definición, video vigilancia remota, entre otros [2].

La forma en que se satisface la demanda de ancho de banda actual es por medio de la tecnología DWDM, que permite el transporte de distintas portadoras ópticas que modulan de manera simultánea a través de una misma fibra óptica. La asignación de espectro en redes ópticas DWDM están especificadas por la recomendación ITU-T G694.1, que establece una separación espectral fija de entre cada portadora óptica que puede ser 12.5, 25, 50 o 100 GHz [3], siendo la más usada la de 50 GHz que permite transmitir señales a velocidades de 2.5, 10, 40 y 100 Gbps [4]. Al ser una asignación fija a todas las velocidades se les asigna la misma cantidad de espectro, sin importar que requieran menos para su transmisión, por lo que existe espectro ocioso en el sistema actual [5].

Además, el tráfico anualmente crece de manera exponencial entre un 35% a 50% anual [6] con demandas que se espera vayan desde los 2.5 Gbps a 1Tbps [7], y que mediante el sistema actual las de 400 Gbps y 1Tbps no podrían ser transmitidas por el sistema de grilla fija de 50 GHz. Una solución apresurada sería ampliar la separación de 50 GHz a una mayor pero eso solo generaría mayor espectro ocioso a las velocidades de transmisión digital con menor requerimiento espectral [8]. Esto a largo plazo amenaza con dejar obsoleta la operación en redes DWDM con grilla fija, por lo que es necesario buscar otras medidas permitan soportar la creciente demanda de tráfico.

Para solucionar el problema de uso de recursos se ha propuesto una forma más eficiente de operar la red, es decir pasar de una red DWDM estática a una red dinámica. En este caso las demandas no se conocen y la asignación de recursos se realiza mientras se haga uso de ellos, es decir se hace de forma *on-line* mientras la red se encuentre operativa [9]. Mientras no se necesite enviar datos, los recursos de red estarían disponibles. Así, potencialmente se podría brindar servicios a un mayor número de usuarios.

Otra solución es operar el espectro de forma más eficiente, pasando de una grilla fija a una grilla flexible, lo que permitiría subdividir el espectro en pequeñas porciones y asignarlo acorde a los requerimientos en ancho de banda según la tasa de transmisión digital o formato de modulación de la señal [10].

Para realizar este tipo de cambios en la red (pasar a modo de operación dinámica y grilla flexible) se debe contar con dispositivos ópticos tales como transmisores, receptores, conmutadores ópticos, transpondedores que operen y reciban señales a diferentes tasas de transmisión digital y/o frecuencias dentro de la banda C, dividiendo el espectro en pequeñas unidades de típicamente 12.5 GHz denominadas FSU (*Frequency Slot Unit*).

Llegado a este punto, queda recalcar que para establecer conexiones ópticas entre pares de nodos de una red flexible es necesario definir una ruta y asignación de espectro en el caso de algoritmos RSA, y en adición a lo anterior agregando una asignación de formato de modulación sería lo que se conoce como algoritmos RMLSA. Los algoritmos RMLSA pueden ser conjuntos o secuenciales, y buscan resolver el problema de asignación de ruta, formato de modulación y espectro que utilizará una señal transmitida entre un par de nodos.

Para poder migrar a una red óptica dinámica y flexible, es necesario definir el número de dispositivos necesarios para que pueda operar adecuadamente. Este proceso se denomina como “dimensionamiento de la red”. Dimensionar es una parte importante en el diseño de redes ópticas flexibles, tener conocimiento del número de dispositivos necesarios para que una red opere, ya sean dispositivos electrónicos: transpondedores de transmisión y recepción, o recursos ópticos: número de FSUs, garantiza la sustentabilidad de las nuevas tecnologías en el área de las telecomunicaciones, asegurando su permanencia en el tiempo. Por lo que en este trabajo se dimensionarán ambos (tanto dispositivos como recursos ópticos) de modo de tener recomendaciones a tener en consideración según carga de tráfico, velocidad de transmisión, formato de modulación y los recursos necesarios para cumplir la probabilidad de bloqueo umbral.

Objetivos generales

- Determinar el número de dispositivos (transpondedores) y recursos ópticos (FSUs), a fin de contar con recomendaciones en una posible implementación de una red óptica dinámica, flexible, y enlaces transparentes.

Objetivos específicos

- Estudiar y analizar distintas propuestas de algoritmos de asignación de recursos (RMLSA) en redes ópticas flexibles.
- Dimensionar, vía simulación redes ópticas flexibles en operación dinámica teniendo en cuenta distintas cargas de tráfico y formatos de modulación.
- En base a los resultados obtenidos, dar recomendaciones que sirvan a los operadores de red en la toma de decisiones en cuanto a la implementación de su red.

La distribución de esta investigación se estructurará de la siguiente forma:

- Capítulo 1: Introducción a las redes ópticas.
- Capítulo 2: Propuesta de dimensionamiento en algoritmos RSA.
- Capítulo 3: Parámetros y consideraciones para el simulador.
- Capítulo 4: Análisis de los resultados a distintos escenarios.
- Capítulo 5: Conclusiones obtenidas de la investigación.

Redes Ópticas

1.1 Introducción

En este capítulo se realiza una presentación de los conceptos necesarios en la elaboración de este tema de investigación, de modo de formular una pregunta de investigación adecuada y consecuente a la respectiva respuesta que llevará a su solución.

1.2 Redes DWDM

La importancia de las redes de datos y transferencia de información ha ido alcanzando mayor relevancia con el paso de los años, al igual que la cantidad de información y velocidad a la que se transmite. Como resultado se tiene la globalización de las redes de comunicaciones, tal como se aprecia en la Figura 1-1, donde se observa el mapa del cableado submarino de fibra óptica actualizado al 31 de octubre del 2016.

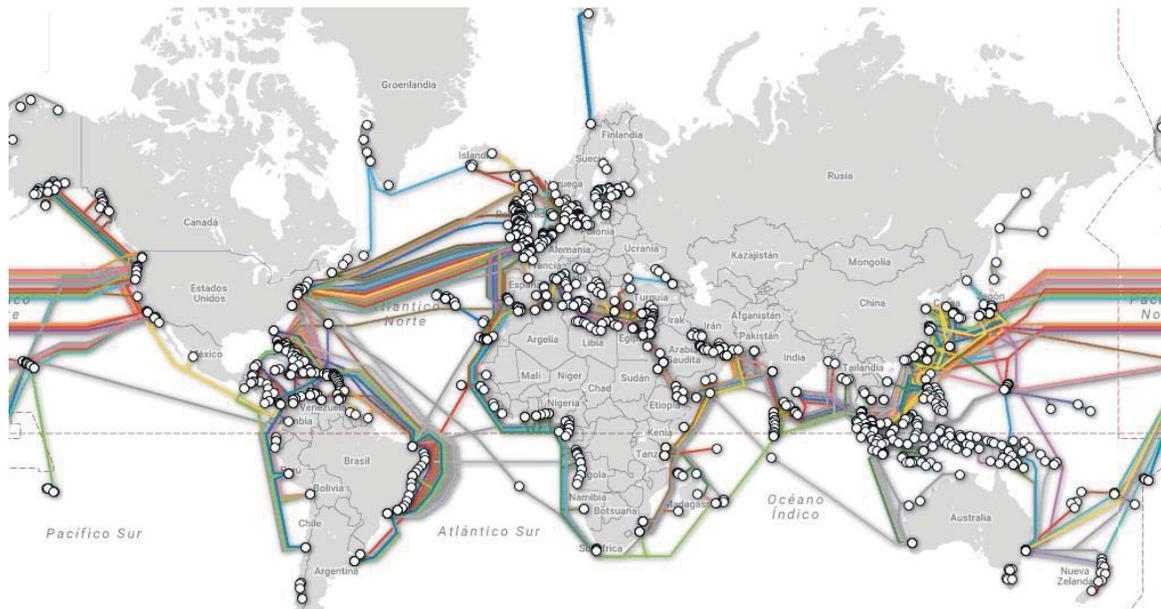


Figura 1-1: Mapa cableado submarino [11].

Las empresas de telecomunicaciones han tenido que implementar nuevas tecnologías de multiplexación sobre los enlaces de fibra óptica existentes para soportar de este modo los altos requerimientos de ancho de banda de la actualidad. La multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM) es una tecnología que se utiliza en la transmisión de varias longitudes de onda sobre una misma fibra en la banda C [12]. En este caso, cada longitud de onda representa un canal óptico dentro de la fibra óptica, permitiendo combinar dichos canales y extraerlos en puntos apropiados a lo largo de la red.

Al transmitir varios canales de forma simultánea se logra incrementar el ancho de banda del medio de transmisión, es decir que la capacidad se ve multiplicada por cada longitud de onda individual transmitida de esta forma. Como ejemplo en la figura 1-2 se presenta un sistema básico que consta de tres señales. En este se utilizan tres transpondedores y un multiplexor para unir las señales para ser transmitidas por una única fibra desde la zona de transmisión y un demultiplexor para separarlas, más tres transpondedores de recepción.

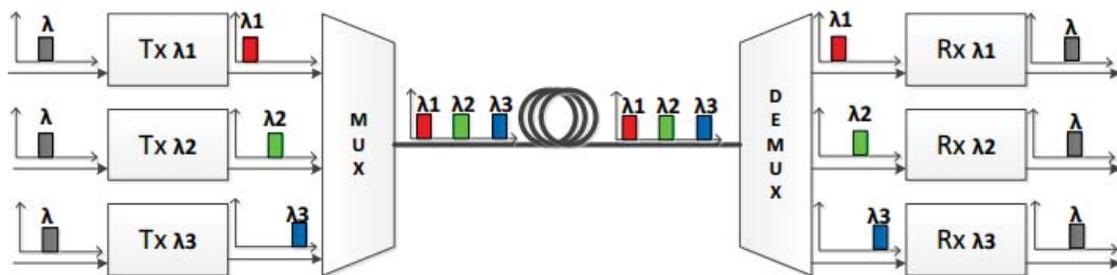


Figura 1- 2: Esquema sistema DWDM de tres señales.

1.3 Redes DWDM según tipo de operación

Las redes DWDM pueden ser clasificadas en 2 grupos según el tipo de operación; redes ópticas estáticas o redes ópticas dinámicas. Estas se diferenciarán en la forma en que se establecen los caminos ópticos o *lightpaths*.

1.3.1 Redes DWDM estáticas

En la actualidad, las redes DWDM operan bajo operación estática. En este tipo de redes las conexiones ópticas son permanentes o cuasi permanentes, eso quiere decir que se establecen *lightpaths* dedicados entre pares de nodos de la red, independiente del nivel de utilización de los mismos. Dicho de otro modo, las conexiones permanecen establecidas sea que se usen para transmitir información o no. Otro detalle es el establecimiento de conexiones, esto se realiza antes de la puesta en marcha de la red, es decir de manera *off-line*.

En la figura 1-3 se muestra la evolución temporal de una red de 5 nodos con dos conexiones ópticas permanentes identificadas con los colores rojo y azul. La flecha indica el sentido en el que

se transmite la información. La conexión en color rojo permite transferir información desde el nodo 1 al nodo 5, y la conexión en color azul desde el nodo 4 al nodo 2. Es necesario destacar que en la medida que transcurre el tiempo las conexiones no cambian [13].

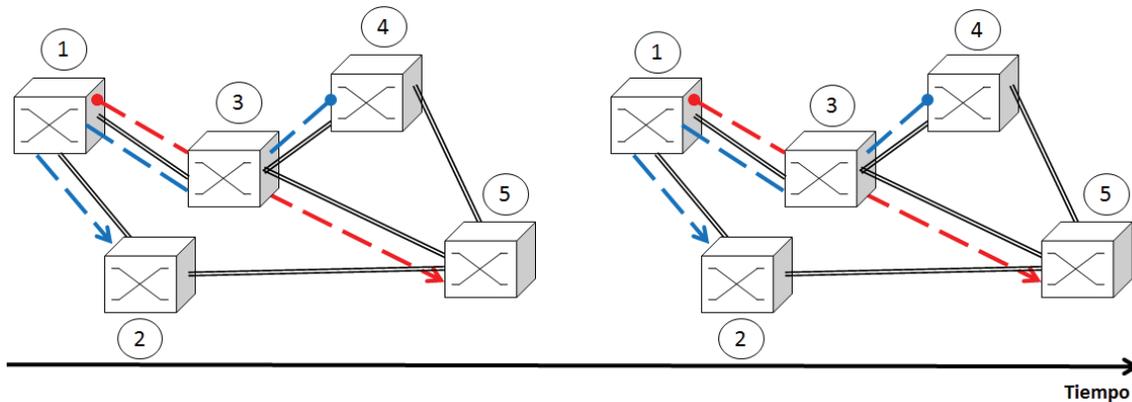


Figura 1-3: Ejemplo de conexiones ópticas en una red estática DWDM a lo largo del tiempo [13].

1.3.2 Redes DWDM dinámicas

En el caso de redes DWDM dinámicas, los *lightpaths* se establecen bajo demanda y sólo por el tiempo que se necesite para enviar la información. Es decir que las conexiones entre los nodos se establecerían por periodos de tiempo cortos y sólo cuando existiese información para ser transmitida. Una vez finalizado el envío de información, la conexión se libera y los recursos de red que habían sido reservados para la conexión quedarían disponibles para establecer otras conexiones [13].

En la figura 1-4 se tiene como ejemplo una red dinámica de 5 nodos y su correspondiente evolución temporal. En un principio se tiene dos conexiones ópticas entre los pares de nodos 1-5 y 4-2, siendo el nodo 1 y el nodo 4 los nodos fuente. Posterior los recursos se liberan y se generan otras peticiones de conexión, una de color rojo entre los nodos 1-4, otra de color azul entre los nodos 2-5 y una de color verde entre los nodos 1-5.

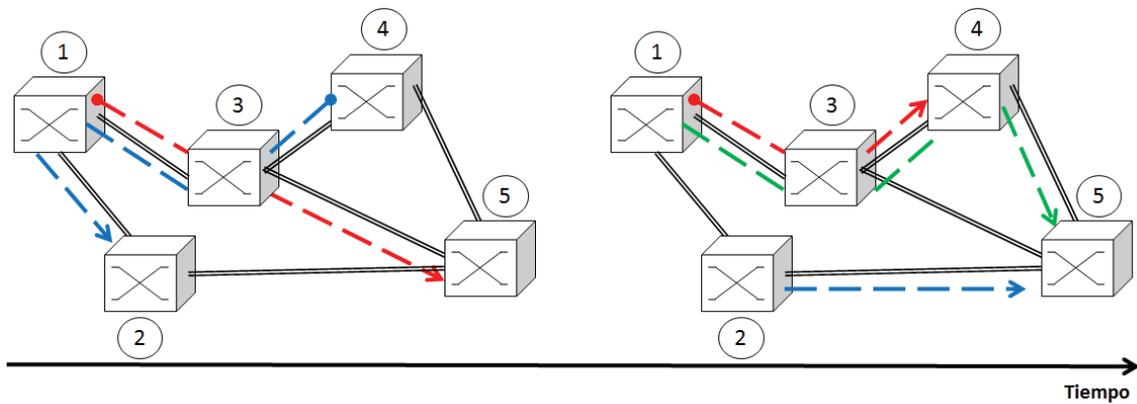


Figura 1-4: Ejemplo de conexiones ópticas en una red dinámica DWDM a lo largo del tiempo [13].

1.4 Redes ópticas según el tipo de asignación de espectro

Las redes ópticas pueden ser clasificadas en dos grupos:

- Grilla Fija
- Grilla Flexible

A partir de las demandas de tráfico ambas grillas tendrán diferentes características entre sí, presentando diferencias en torno a la eficiencia espectral.

1.4.1 Grilla Fija

Es la grilla usada actualmente, se encuentra bajo el estándar recomendado por la ITU-T G.694.1, en la cual se especifica que una separación fija entre canales puede ser 12.5, 25, 50 o 100 GHz, siendo la más usada la separación de 50 GHz. Al asignar la misma cantidad de espectro a todas las peticiones genera un problema en lo relacionado a la eficiencia espectral, dado que dependiendo de la demanda no todas requieren la misma porción de espectro. En la Figura 1-5 a) se da un ejemplo para una separación típica de 50 GHz, en la que a cada portadora se le asigna el mismo ancho espectral a tasas de transmisión de 2,5, 10, 40 y 100 Gbps, y por consiguiente en la mayoría de los casos se obtiene espectro ocioso o inutilizado.

1.4.2 Grilla Flexible

Para aprovechar de manera eficiente el espectro disponible se ha propuesto utilizar la grilla flexible, en la cual a cada portadora se le asigna un espectro acorde a la necesidad de la señal de información, reduciendo la separación entre portadoras ópticas al mínimo, permitiendo de éste modo aumentar la capacidad del sistema reduciendo el espectro ocioso que presentaba la grilla fija. Lo anterior queda representado en la Figura 1-5 b) [14]

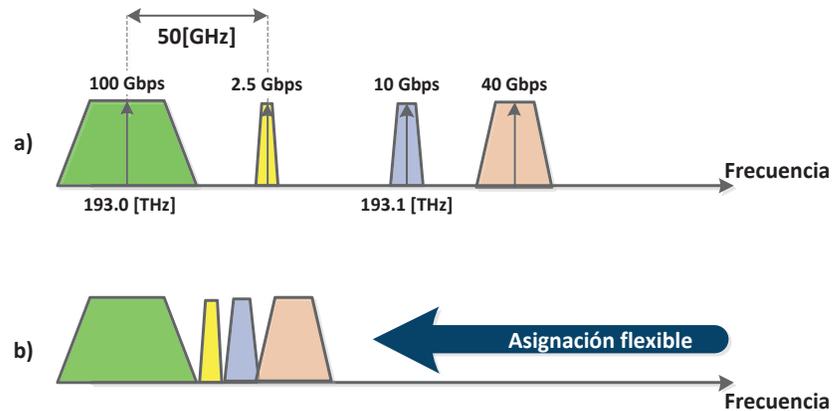


Figura 1-5: Distribución espectral según tipo de grilla. A) Grilla fija B) Grilla flexible [14].

1.5 Problemática redes DWDM

En la última década el progreso se ha reducido drásticamente debido a que el ancho de banda disponible se ha ocupado y los aumentos de capacidad ahora requieren mejoras en eficiencia utilizando de mejor manera el ancho de banda óptico [15]. El continuo aumento en la demanda de tráfico de datos en redes ópticas (a tasas de 35 a 50% anuales) [6] y a la heterogeneidad de las conexiones (a distintas tasas de transmisión digital) es producido debido al aumento de la población y a los crecientes requerimientos de servicios entregados por internet. Se espera que las redes ópticas DWDM tengan problemas para cubrir el tráfico de datos en un futuro cercano.

Producto del crecimiento continuo en el tráfico la necesidad por una mayor capacidad del sistema se está agudizando [15]. Se ha propuesto una migración a redes flexibles con el propósito de mejorar el uso del espectro [16].

1.5.1 Migración a redes flexibles

La migración a redes flexibles o *flexgrid* nace a raíz del continuo aumento del tráfico en las redes actuales, y la necesidad imperante por un aumento de capacidad. La recomendación ITU-T G.694.1 establece una serie de rejillas espectrales fijas, que dividen el espectro óptico relevante entre 1530-1565 nm en la banda C para el uso DWDM, que van desde un mínimo de 12.5 GHz hasta los 100 GHz siendo los más utilizados los de 50 GHz y 100 GHz. Aquí se generan 2 casos: el primer caso es que los canales con una demanda más baja que la máxima soportada por el ancho de banda impuesta infrutilicen recursos de la red; en el segundo caso, la transmisión de velocidades mayores a 100 Gbps, dado que en la actualidad se está investigando la transmisión a 400 Gbps y 1Tbps, velocidades o tasas de datos que no pueden ser transmitidas a largas distancias mediante una única portadora dentro de la rejilla de 50 GHz.

En cambio, la grilla flexible trata de que a cada portadora se le asigne un espectro acorde a la necesidad de la señal, es decir que no sería necesario disponer de una separación de 50 GHz fija, sino que esta sería adaptable. Un ejemplo sería comparar la rejilla actual de 50 GHz, permite usar

velocidades de transmisión de 2.5, 10, 40 y 100 Gbps, pero si se quisiera implementar conexiones de 400 Gbps o más es insuficiente, dado que requiere anchos de banda mayores a 50 GHz.

1.5.2 Comparación entre grillas

Como se ha mencionado en el apartado anterior existen diferencias entre ambas grillas, en una se posee un ancho de banda fijo entre canales DWDM, y en otra se busca una asignación de portadoras flexible dependiendo de la velocidad de transmisión. En la Tabla 1-1 se comparan la grilla fija y la grilla flexible según los aspectos tratados en la sección 1.4.1, mostrando diferencias en cuanto a ancho de banda a usar, uso del espectro y velocidades de transmisión permitidas según separación espectral. Estos factores han de ser considerados, ya que en la actualidad y en el futuro cercano el tráfico en la red será altamente heterogéneo, por lo que la flexibilización en la disposición de los recursos de la red óptica es un desafío próximo.

Tabla 1-1: Comparación entre Grilla fija y flexible.

Grilla fija	Grilla Flexible
Ancho de banda fijo, típicamente 50 [GHz]	Ancho de banda variable.
Infrautilización del espectro para tasas de transmisión pequeñas	Uso eficiente de los recursos de la red
Con 50 [GHz] se pueden transmitir tasa de datos de 2.5, 10, 40 y 100 [Gbps]	Cada portadora se le asigna un espectro acorde a la necesidad de la señal, permitiendo transmitir conexiones de 400 [Gbps], incluso de 1 [Tbps]

1.6 Dispositivos de una red óptica Flexible

En una red óptica flexible se requieren dispositivos de transmisión, recepción y conmutación de señales capaces de soportar demandas heterogéneas ante la disposición flexible del espectro [17] [18]. En la parte de transmisión y recepción se tienen los transpondedores flexibles, los que tienen por propósito generar-recibir señales respectivamente con un ancho de banda variable. Este tipo de dispositivo se les conoce como BVT (*Bandwidth Variable Transponder*) []. Finalmente las propuestas de conmutadores ópticos flexibles se basan en los denominados WSS (*Wavelength Selective Switch*). Tienen la capacidad de dirigir un canal, con un ancho de banda variable y dada alguna ubicación espectral, desde cualquier puerto de entrada hacia cualquier puerto de salida.

1.6.1 Transpondedor flexible (BVT)

Para el uso en redes ópticas flexibles no se pueden implementar los utilizados en las redes actuales, dado que requieren ciertas características concretas. Las características más importantes que ofrecen este tipo de dispositivos son que permite generar y recibir señales con ancho de banda variable, operar a distintas velocidades de transmisión y diversos formatos de

modulación, y como se aprecia en la Figura 1-6 a) el tráfico se dirige desde un nodo origen a un único destino.

Para hacer posible el uso de transpondedores flexibles ha sido necesario cambiar la estandarización del rango de frecuencias de la ITU-T, de modo que permita una configuración flexible [19].

1.6.2 Transpondedor flexible *sliceable* (SBVT)

Un transpondedor flexible *sliceable* SBVT funciona de forma similar al BVT. En el caso de un BVT de alto *bit rate* se tiene cierto problema cuando se opera a una velocidad inferior a su velocidad máxima (debido al alcance óptico o deficiencias en la ruta óptica), dado que se desperdicia parte de la capacidad que posee el BVT. Para abordar ese problema se ha propuesto el SBVT, esto debido a que tiene la capacidad de enviar información a uno o múltiples destinos [20], es decir que puede comunicar un nodo fuente con varios nodos destinos como se ilustra en la Figura 1-6 b). Esta cualidad permite reducir el requerimiento de dispositivos y obtener ahorros en término de costos y consumo energético [21].

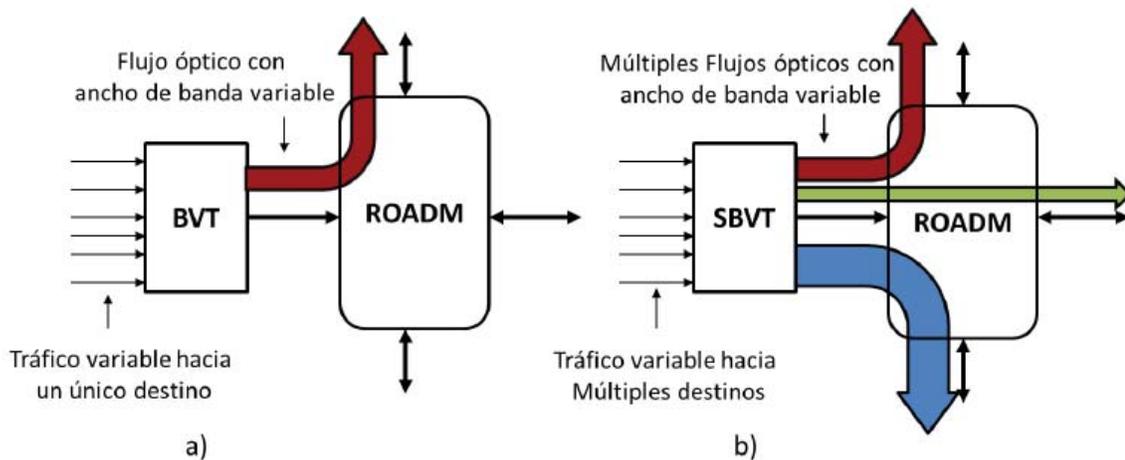


Figura 1-6: a) *Bandwidth variable transponder* (BVT) y b) *Sliceable BVT* (SBVT).

1.6.3 Conmutador selector de longitud de onda (WSS)

El conmutador selector de longitud de onda o *wavelength selective switching* es un método que permite el cambio de longitudes de onda individuales entre múltiples fibras, es decir que mediante una interfaz gráfica de control permite escoger que longitud de onda recorrerá un determinado canal, además de ser capaces de multiplexar y demultiplexar.

Se diferencian en los WSS de la red óptica actual en que deben ser flexibles, dado que las señales pueden tener distintos anchos espectrales (por ser de distintas tasas de transmisión y/o formatos de modulación).

1.6.4 Nodos elásticos o flexibles

Los nodos elásticos se conforman principalmente por WSSs y BVTs, y se encargan de añadir, quitar y conmutar los canales ópticos [22].

Además, como características principales los nodos elásticos deben tener:

- *Colorless*: Deben permitir la incorporación de un transpondedor que transmita subportadoras en cualquier segmento del espectro (en la banda C), en cualquiera de sus terminales.
- *Directionless*: Los elementos de conmutación deben tener la capacidad de conmutar y direccionar las señales desde cualquier puerto de entrada a cualquier puerto de salida.
- *Contentionless*: Debe permitir quitar un camino espectral (Spectrum Path) en más de un puerto de salida (importante para nodos con grados nodales altos). El grado nodal se refiere al número de enlaces que se conectan al nodo.
- *Gridless*: La posibilidad de conmutar señales con cualquier ancho de banda.

Dependiendo de su grado nodal los nodos ópticos reciben las denominaciones siguientes:

- Reconfigurable *Add Drop Multiplexer* (ROADM): Para nodos con un grado nodal bajo, por ejemplo, solo dos enlaces conectados al nodo.
- *Optical Cross Connect* (OXC): Para configuraciones con grado nodal alto. Por ejemplo, en redes enmalladas con tres o más enlaces conectados a los nodos.

En la Figura 1-7 contiene la arquitectura de un nodo OXC. Posee cuatro fibras ópticas de entrada y cuatro de salida. En la etapa de conmutación, se utilizan splitters los cuales replican las señales de las fibras de entrada en los WSS asociados a cada fibra óptica de salida. En la parte inferior, se tienen a los transpondedores flexibles de transmisión y recepción, los cuales se encargan de añadir y quitar canales ópticos. En la figura, también se representa la posibilidad de que canales con diferente ancho de banda puedan ser conmutados desde cualquier fibra de entrada hacia cualquier fibra de salida.

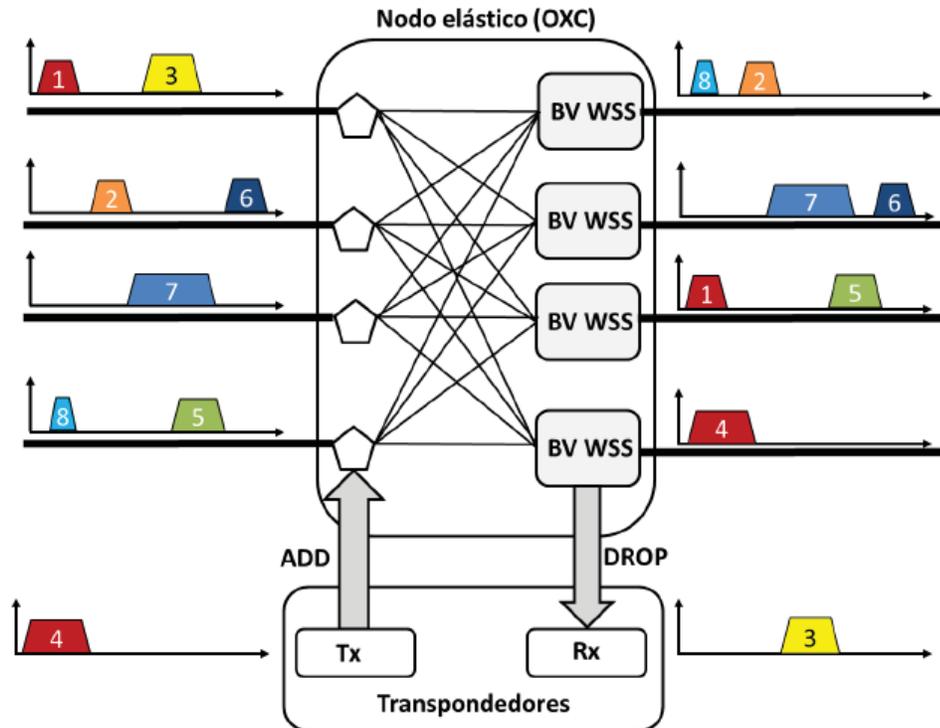


Figura 1-7: Arquitectura genérica de un nodo elástico.

1.7 Algoritmos RMLSA

En redes ópticas flexibles la principal problemática a solucionar se conoce como RMLSA (*Routing, Modulation Level and Spectrum Allocation*) [23]. Consiste en tres procesos, que es la asignación de la ruta, el formato de modulación y la cantidad de espectro necesario (o número de FSUs) necesarios según la señal de información a transmitir entre dos nodos de la red [24]. Antes de entrar en detalle en los algoritmos RMLSA, es necesario definir el concepto de FSU, dado que es clave en el desarrollo de este trabajo.

1.7.1 *Frequency Slot Unit (FSU)*

Corresponde a la unidad mínima de espectro que puede ser asignada en una red óptica flexible. El espectro óptico se divide en porciones de una anchura fija de 12,5 GHz, por lo que se pueden tener varios FSUs dependiendo del ancho de banda que se disponga en la red. La banda C pertenece a la 3era ventana y está entre los 1530-1565 nm según se aprecia en la figura 1-8, lo que se traduce en un ancho de banda de 4000 GHz, que divididos en la unidad mínima FSU se posee un total de 320 FSUs máximos por fibra óptica.

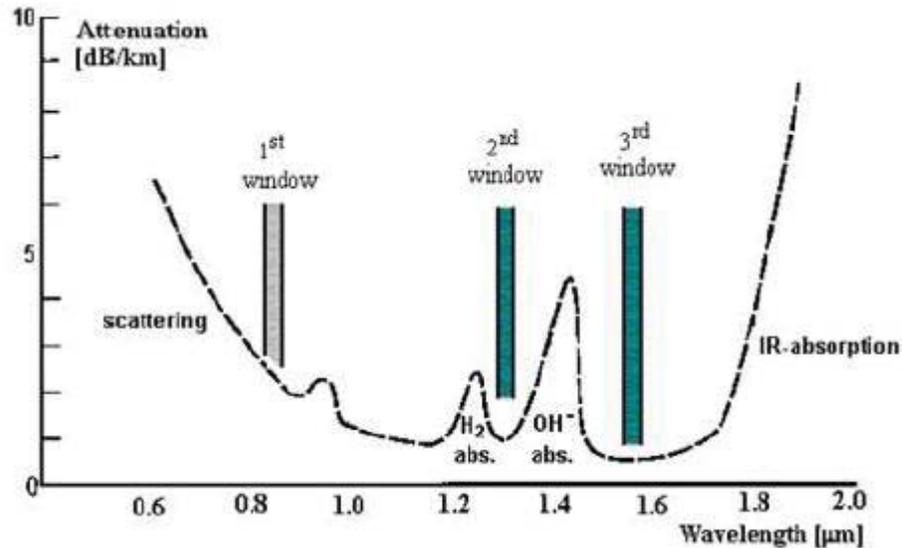


Figura 1-8: Atenuación según la longitud de onda y ventanas ópticas

1.7.2 Restricciones en algoritmos RMLSA

Los algoritmos RMLSA poseen ciertas restricciones, ya sea en operación estática o dinámica que deben cumplir las conexiones ópticas entre 2 nodos de la red:

- Continuidad en el espectro: La asignación de portadoras o FSUs debe ser la misma en todos los enlaces que componen la ruta (entre el nodo de origen con el nodo de destino). Esta restricción tiene validez para redes transparentes. Si la red posee dispositivos con conversión de espectro la restricción puede ser eliminada.
- Contigüidad del espectro: Los trozos de espectro o FSUs deben ser asignados de manera consecutiva, esto quiere decir que al establecer una conexión entre un par de nodos los FSUs candidatos deben estar espectralmente consecutivos.
- Separación de canales: Se debe asignar una banda de guarda entre cada canal, sobre todo si la técnica de modulación se basa en sub-portadoras, como por ejemplo OFDM.
- Asignación única de cada FSU: Una portadora o grupo de FSUs no puede ser asignado a dos o más demandas al mismo tiempo en un mismo enlace. Solo puede ser asignado a una única demanda de tráfico mientras se encuentre activa. Una vez que los recursos son liberados pueden volver a ser asignados a otras demandas.
- Alcance óptico: Dada una petición de conexión entre uno nodo A y un nodo B, se debe satisfacer la restricción de alcance óptico de la señal con un formato de modulación adecuado. Esto se refiere a la distancia máxima que puede recorrer una señal en la red de forma transparente, hasta que por su nivel de degradación sea necesario regenerarla.

1.7.3 Algoritmos RMLSA secuenciales

Los algoritmos RMLSA de manera secuencial se descomponen en tres etapas para alcanzar una solución:

1. Algoritmo de ruteo (RA: *Routing Assigment*)
2. Algoritmo de asignación del formato de modulación (MLA: *Modulation Level Assigment*)
3. Algoritmo de asignación de espectro (SA: *Spectrum Allocation*)

Cada algoritmo realiza una tarea específica para dar solución al problema RMLSA. En el siguiente apartado se detalla el problema que debe resolver cada tipo de algoritmo al momento de generarse una petición de conexión entre dos nodos.

1.7.4 Algoritmo de asignación de ruta (RA)

Considerando la asignación de ruta se distinguen tres tipos de ruteo que abordan el problema, las cuales se describen a continuación:

- a) Ruteo fijo: En este tipo de ruteo se pre-calcula y asigna sólo una ruta para establecer una petición de conexión entre cada par de nodos de la red. La ruta elegida generalmente es la más corta, teniendo como patrón el largo de los enlaces o el número de saltos. Al llegar una petición de conexión, el plano de control tiene una tabla de ruteo pre-fijado que contiene sólo una ruta para conectar a cada par de nodos de la red. En el ruteo fijo se posee el inconveniente que en caso de ocurrir una falla o no se tengan recursos disponibles en la ruta asignada, no se cuenta con una ruta alternativa para establecer la conexión, por lo que en ese caso la petición es bloqueada.
- b) Ruteo fijo alternado: Este tipo de ruteo soluciona de manera parcial el inconveniente que se generaba en el ruteo fijo, dado que se pre-calcula más de una ruta candidata para cada par de nodos de la red, y al igual que en caso de ruteo fijo, el plano de control tiene una tabla de red pero considera K rutas con el menor largo de enlaces. Si la primera ruta más corta no se encuentra disponible, se sigue con la segunda, en el caso que tampoco se tengan recursos disponibles se prueba una tercera ruta (si hubiese), y así sucesivamente hasta llegar a la K-ésima ruta antes de bloquear la petición, donde K es un numero entero igual o mayor a 2.
- c) Ruteo adaptativo: En este caso no se cuenta con ruta principal ni candidata para establecer una conexión entre los diferentes pares de nodos. A diferencia de los ruteos anteriores el cálculo de la ruta depende de las condiciones actuales de la red, es decir, se calcula la ruta mientras la red se encuentra operativa en función del estado de los nodos y/o enlaces. De este modo, existe una mayor probabilidad de tener una ruta factible para comunicar los pares de nodos de la red. La desventaja principal es que se debe ejecutar

un algoritmo con alta carga computacional (por ejemplo *Dijkstra*) para obtener una ruta cada vez que se genere una petición de conexión.

1.7.5 Algoritmos de asignación de formato de modulación (MLA)

En los últimos años se han propuesto diversos esquemas de modulación multi-portadora para las redes ópticas, de los cuales destaca OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing*) [25]. Consiste en enviar la información a través de múltiples sub-portadoras moduladas ortogonalmente, por lo que la velocidad digital total corresponde a la suma de las velocidades de cada sub-portadora OFDM. De este modo, aumentando el número de sub-portadoras se pueden generar súper canales a altas velocidades de transmisión digital.

Para la asignación del formato de modulación y número de sub-portadoras OFDM se tienen las siguientes estrategias:

- I. MAS (Minimum Allocation of Subcarriers): Dada una petición de conexión a una velocidad de transmisión específica, el algoritmo tiene por función asignar un formato de modulación que posea la mayor eficiencia espectral y que cumpla con el alcance óptico de las rutas candidatas.
- II. Modulación no adaptativa (MNA): Para este tipo de algoritmo no se considera la posibilidad de elección del formato de modulación según el alcance de la ruta candidata, por lo que el requerimiento de espectro estaría determinado por la velocidad de transmisión digital a la que emite el nodo fuente y el formato de modulación fijo que se utilizó para llevar a cabo la conexión.

Además, en este proceso se determina el número de FSUs necesarios del par *bitrate*-formato de modulación que requiere la petición de conexión.

1.7.6 Algoritmo de asignación de espectro (SA)

El último objetivo que tiene un algoritmo RMLSA es buscar y asignar el suficiente espectro continuo y contiguo para establecer los FSUs necesarios entregados en el paso anterior.

Entre las estrategias para realizar la búsqueda y asignación de espectro destacan:

- a. First Fit (FF): Realiza el proceso de búsqueda de FSUs consecutivos y contiguos disponibles en una ruta candidata desde el menor a mayor índice hasta encontrar la cantidad de FSUs requerida. Se asigna el primer bloque de FSUs que pueda contener la demanda.
- b. Bit Rate Aware Fit (BRAFF): Tiene en consideración la velocidad de transmisión de cada petición de conexión y en función de ella opta por una estrategia de búsqueda y asignación de FSUs. Dependiendo de las velocidades de transmisión digital soportadas por la red se pueden clasificar en dos tipos, a una se les denomina peticiones de alta velocidad de transmisión digital (se puede considerar por ejemplo, a todas las peticiones con velocidad de transmisión mayores a 100 Gbps) y peticiones de baja velocidad de transmisión digital (aquellas que no cumplan la condición anterior). Para la asignación

de espectro, las peticiones consideradas como de alta velocidad de transmisión digital siempre se le asignan los primeros FSUs consecutivos y contiguos disponibles, en cambio las peticiones consideradas como de baja velocidad de transmisión digital se le asignan los últimos FSUs consecutivos y contiguos disponibles.

- c. *Random Fit (RF)*: Este algoritmo recorre el espectro disponible en la ruta candidata en búsqueda de alguna porción de espectro que pueda contener a la demanda, efectuándose la asignación de FSUs de manera aleatoria.
- d. *Best Fit (BF)*: Este algoritmo busca en la ruta candidata el bloque de espectro disponible más pequeño que permita contener a la demanda de FSUs requerido por el paso anterior.

1.7.7 Causas de bloqueo en algoritmos RMLSA (Probabilidad de bloqueo)

La probabilidad de bloqueo es la cuantificación de la posibilidad de que una petición de conexión no pueda ser atendida bajo ciertos factores. En los algoritmos RMLSA se tienen tres factores que pueden generar un bloqueo:

El primero de ellos implica que no se cuenten con dispositivos de transmisión desde el nodo emisor y dispositivos de recepción en el nodo receptor. Si no se cuenta con el par de transpondedores en alguno de los nodos se genera un bloqueo por falta de transpondedores.

El segundo radica cuando la ruta seleccionada es más extensa que el alcance óptico de los pares *bitrate*-formatos de modulación disponibles por la red, lo que implica que aún el formato de modulación más robusto disponible en la red no permite cubrir la distancia de la ruta, por lo que se genera un bloqueo por falta de alcance en la ruta.

Finalmente otro elemento que causa bloqueo es la insuficiencia de FSUs disponibles en los enlaces de la red, lo que implica que si quisiera generarse una conexión entre un par de nodos, y en la ruta no se dispone de FSUs suficientes (ya sean continuos y contiguos) se genera un bloqueo.

1.8 Dimensionamiento

El proceso de dimensionamiento radica en calcular, de manera analítica o simulación, la cantidad de dispositivos necesarios en la red para que se cumplan con ciertos parámetros del operador de red. El prever de un dimensionamiento acertado reduce costos debido a que se cuenta solo con los dispositivos que se requieren para el funcionamiento de la red, teniendo presente el punto de operación para el cual es válido.

La mayor parte de trabajos están en redes DWDM estáticas, debido a que es el sistema usado en la actualidad, presentando un amplio desarrollo comercial. En [26] por ejemplo se presenta un método de optimización para dimensionar el número total de componentes de red (transceptores) y de longitudes de onda para admitir diversas matrices de tráfico, además de minimizar la cantidad de transceptores necesarios en la red. En [27] se tiene otro dimensionamiento en redes ópticas DWDM, que permite dimensionar el número de longitudes de onda, de modo que conduce a un uso eficiente de los recursos de longitud de onda reduciendo el ancho de banda desperdiciado, a la vez que permite reducir costos por *transceiver*.

En [28] se presenta un método de dimensionamiento para una red óptica flexible. En su desarrollo consta de varios tipos de algoritmo RSA. En grilla fija se tiene el espectro dividido en 50 GHz fijos, con un total de 20 longitudes de onda. En grilla flexible el espectro es dividido en *frequency slices* de 6,25 GHz, contando con un número de *slices* de 160. La red cuenta con $N=8$ nodos a una distancia de 500 km, que permiten comunicación bidireccional. El dimensionamiento de [28] determina el número de *transceivers* y espectro utilizado de manera analítica a distintos requerimientos de tráfico de la red, partiendo con 50, 150 y 500 Gbps.

Las falencias de la bibliografía analizada es que en su mayoría son trabajos para grilla fija, dado el amplio despliegue comercial que se posee en la actualidad. Además en [28] el método no considera redes con topología de mayor número de nodos, y no considera peticiones de conexión a distintas tasas de transmisión digital y distinta probabilidad de ocurrencia. Se requiere, por lo tanto encontrar resultados que incorporen el número de transpondedores y espectro necesario en operación dinámica de una red óptica elástica a distintos formatos de modulación, de modo de encontrar, mediante simulación una aproximación que permita a los operadores de red tomar decisiones en relación a la condición que presentará la red en los próximos años.

1.9 Pregunta de investigación

En este proyecto de título se busca responder la siguiente interrogante:

En una red flexible bajo operación dinámica ¿Es posible contar con un método de dimensionamiento que obtenga el número de transpondedores de transmisión-recepción y recursos ópticos (FSUs) requeridos de modo de no sobrepasar una probabilidad de bloqueo umbral?

Para resolver esta problemática en el capítulo 3 se propone un método de dimensionamiento que determinará la cantidad de dispositivos a utilizar.

2 Simulador de la red

En éste capítulo se define todo lo necesario a tener en consideración en cuanto del simulador y al momento de simular, lo que incluye las variables involucradas en el proceso.

2.1 Simulador.

Para medir el dimensionamiento de un algoritmo RSA se utiliza un simulador de eventos discretos asíncrono [29], programado en lenguaje de programación C++. El simulador representa el funcionamiento de una red óptica elástica bajo operación dinámica. Es decir, representa el establecimiento de conexiones y desconexiones entre los distintos pares de nodos de la red.

En términos generales, el simulador recibe como parámetros de entrada la topología de red, la caracterización del tráfico de datos, capacidad de los enlaces (en términos de espectro o número total de FSUs), formato de modulación y la cantidad de transpondedores flexibles de transmisión y recepción presentes inicialmente en cada nodo.

Mientras se ejecuta el simulador, dos tipos de eventos pueden ocurrir, los cuales se describen a continuación:

Evento de petición de conexión: En una red óptica elástica se produce una solicitud de conexión entre el nodo fuente y el nodo destino, indicando la velocidad de transmisión digital a la cual se procederá a enviar la información. Luego se comienza a ejecutar el algoritmo RSA, el cual se implementa en el plano de control de la red. La primera tarea que ejecuta el algoritmo es calcular y asignar una ruta para conectar los nodos fuente y nodo destino a través de la red. Si el ruteo se realiza de manera off-line (ruteo fijo o fijo alternado), las rutas son obtenidas a partir de una tabla que contiene a las rutas candidatas para conectar todos los pares de nodos de la red utilizada. Una vez obtenidas las rutas candidatas, estas son proporcionadas al algoritmo encargado de asignar los requerimientos de espectro o número de FSUs según el formato de modulación. El formato de modulación asignado por el algoritmo es determinado por el operador de red. Sea cual fuere la elección, este algoritmo se traduce en un requerimiento de espectro o número de FSUs. A esto se le debe agregar una banda de guarda, utilizada para separar los canales y facilitar su posterior filtraje y recuperación en el nodo destino. Como proceso final, el requerimiento total de espectro es proporcionado como parámetro de entrada a un algoritmo SA, cuyo propósito es efectuar la búsqueda de espectro disponible o FSUs en las rutas candidatas para establecer la conexión

requerida. Si el algoritmo SA logra encontrar la suficiente cantidad de espectro, entonces se procede a guardar y asignar los recursos para establecer la conexión. En caso contrario, si esta búsqueda no encuentra la cantidad de FSUs necesaria, entonces se produce un bloqueo, es decir, la conexión no puede ser establecida y es rechazada. Luego de la ocurrencia de este tipo de evento, es necesario actualizar los contadores estadísticos utilizados, por ejemplo peticiones atendidas y bloqueadas, dado que permiten cuantificar el estado de la red.

Evento de desconexión: A diferencia de un evento de conexión, en un evento de desconexión se liberan los recursos (espectro y dispositivos) previamente utilizados para comunicar un par de nodos en la red.

Para la obtención de resultados en un algoritmo RSA el simulador genera un gran número de peticiones de conexión. Luego de procesar todas las peticiones de conexión generadas, el simulador concluye. El simulador calcula y entrega información de interés a partir del valor final de los contadores estadísticos.

2.2 Probabilidad de bloqueo (Pb)

La probabilidad de bloqueo es la probabilidad de que una petición de conexión no pueda ser atendida por falta de alcance óptico, transpondedores de transmisión y recepción, o espectro consecutivo disponible en la red (FSU), por lo que al no tener recursos disponibles se genera un bloqueo.

El propósito de ésta investigación es que no se sobrepase una probabilidad de bloqueo umbral (P_0), teniendo como variable de capacidad el número de transpondedores inicial y un número lo suficientemente grande de FSUs de modo de no obtener bloqueos por FSU y tener independizados los bloqueos por Transpondedores.

Además, la probabilidad de bloqueo global se define como el cociente entre el total de peticiones bloqueadas y el total de peticiones de conexión generadas en la simulación, descrito en la Ec. 2-1

$$Pb_{global} = \frac{\text{Peticiones bloqueadas}}{\text{Peticiones generadas}} \quad (2-1)$$

También es posible obtener información adicional de la probabilidad de bloqueo para cada tipo de petición de conexión, de acuerdo a su velocidad de transmisión, quedando las peticiones generadas y bloqueadas de cada tipo como se describe en la Ec 2-2

$$Pb(\text{petición tipo } i) = \frac{\text{Petición del tipo } i \text{ bloqueadas}}{\text{Peticiones del tipo } i \text{ generadas}} \quad (2-2)$$

2.3 Modelo de Tráfico y Carga de Tráfico

En el desarrollo del área de las redes comunicacionales se han propuesto diferentes modelos de tráfico con una gran utilidad en el modelamiento en las redes tradicionales, algo sumamente útil para los operadores de red en cuanto a parámetros a considerar en sus sistemas.

La manera en que se realizan los envíos de información entre los nodos se debe representar mediante un modelo de tráfico, donde el simulador genera peticiones de conexión entre todos los pares de nodos de la red, a un cierto *bit rate* y por un determinado instante de tiempo. En términos de esta investigación se utiliza el modelo de tráfico *On-Off*, donde existen dos periodos de tiempo denominados “*On*” y “*Off*”. Durante el periodo *On* el nodo fuente transmite a una cierta velocidad de transmisión digital, y en el periodo *Off* el nodo fuente no transmite información. La duración de ambos periodos es descrita a través de una variable aleatoria con distribución de probabilidad exponencial.

La carga de tráfico (ρ) ofrecida por cada conexión a la red es la siguiente:

$$\text{Carga de Tráfico } (\rho) = \frac{\text{Mean_On}}{\text{Mean_On} + \text{Mean_Off}} \quad (2-3)$$

Donde:

- *Mean_On*: Tiempo medio que duran las peticiones de conexión.
- *Mean:Off*: Tiempo en que la fuente no transmite información.

Mientras mayor es el valor de ρ menor es el tiempo durante el cual no se transmite información entre los pares de nodos de la red, dando como resultado una menor cantidad de recursos disponibles para atender nuevas peticiones de conexión.

El valor de *Mean_Off* se ajusta dependiendo de la carga de tráfico mediante la ecuación 2-4 que es un despeje de la ecuación 2-3 pero en función de *Mean_Off*.

$$\text{Mean}_{off} = \text{Mean}_{on} \cdot \frac{1 - \rho}{\rho} \quad (2-4)$$

3 Metodo de Dimensionamiento basado en el simulador de eventos discretos

En este capítulo se propone un método de dimensionamiento, basado en simulación, para obtener el número de transpondedores y número de FSUs necesarios en una red óptica flexible dinámica para asegurar que no se supere una probabilidad de bloqueo umbral. Se presentará la ilustración del diagrama en bloques del dimensionado propuesto junto con la descripción de cada proceso.

3.1 Descripción general

Mientras se ejecuta el simulador, el programa va almacenando el número de FSUs que requieren los enlaces quedando el máximo valor. Aunque en cierto momento la red este utilizando menos recursos ópticos se mantiene el valor mayor, y así sucesivamente hasta que es sustituido por un valor mayor que el almacenado. De esta forma se registra el número de FSUs que se requirieron para ciertos parámetros de entrada. Para el caso del dimensionamiento de los transpondedores, al final de cada simulación se comprueba la probabilidad de bloqueo, y dependiendo de su valor se modifican los valores de capacidad, volviendo a simular con la nueva capacidad para comprobar que se cumpla la condición de probabilidad de bloqueo umbral.

3.2 Definición del procedimiento

El dimensionamiento del algoritmo RSA se representa en el diagrama de la Figura 3-1, el cual muestra los pasos a seguir en la obtención de la capacidad del sistema.

Para la ejecución de los pasos se define lo siguiente:

- Tx : Número de transpondedores de transmisión en cada nodo de la red.
- Rx : Número de transpondedores de recepción en cada nodo de la red.
- M : Valor grande.
- ρ : Carga de tráfico del sistema.
- D_{FSUmax} : Número de FSUs que se disponen en los enlaces.
- Po : Probabilidad de bloqueo umbral.
- Pb : Probabilidad de bloqueo global obtenida.
- $C(Tx, Rx, D_{FSUmax})$: Capacidad del sistema en cada proceso de dimensionamiento.
- N_{FSU} : Número de FSUs que se utilizaron para establecer las peticiones de conexión.
- $C(Tx, Rx, N_{FSU})$: Capacidad del sistema final que cumple con Po .

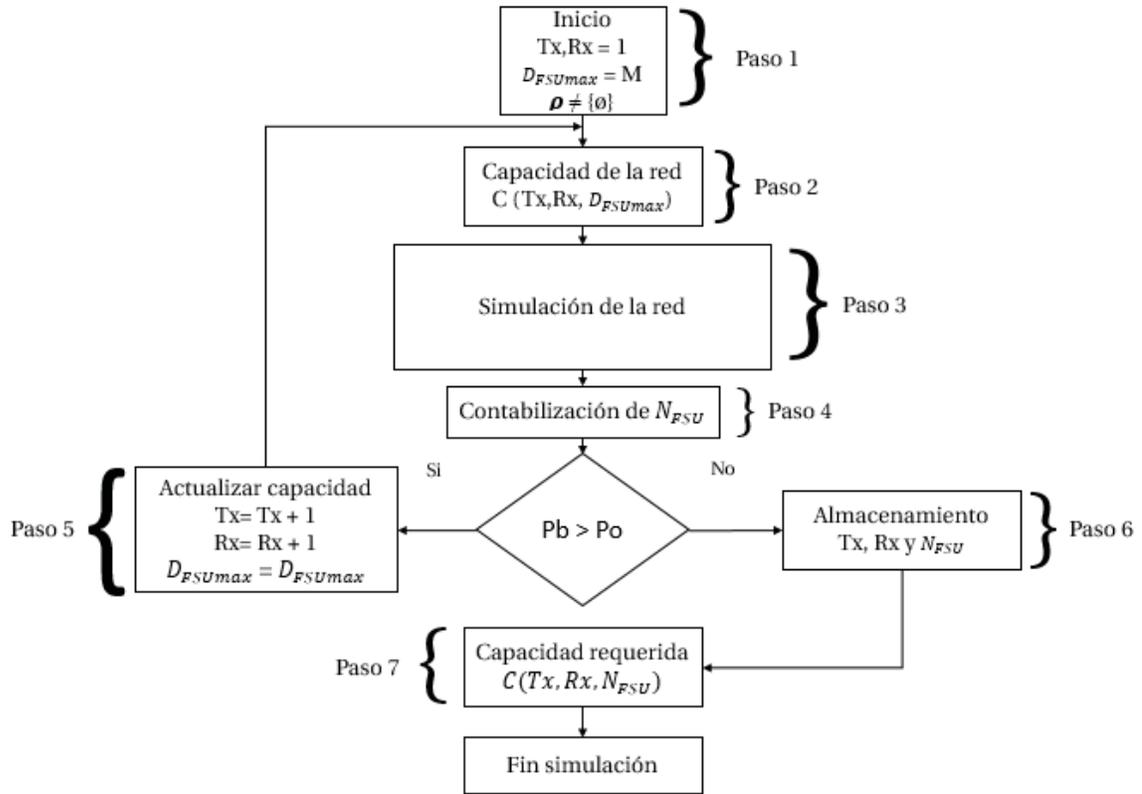


Figura 3-1: Diagrama del dimensionamiento propuesto.

Los pasos comprenden desde el 1 al 7, llevándose a cabo las siguientes operaciones:

Paso 1: Se inicializan las variables. El número de transpondedores Tx y Rx se inicializan en un valor pequeño, en cambio D_{FSUmax} se inicializa en un valor elevado (especificado en el capítulo 4) de modo que no se obtengan bloqueos por FSUs. La carga de tráfico ρ es un valor designado por el operador de red, y determinará el nivel de tráfico que espera el operador de red en su sistema.

Paso 2: Almacenando valor de capacidad actual del sistema; Número de dispositivos por nodo y número disponible de FSUs por enlace $C(Tx, Rx, D_{FSUmax})$.

Paso 3: Según $C(Tx, Rx, D_{FSUmax})$ obtenida en el paso anterior, se ejecuta la simulación de la red por medio del simulador de eventos discretos explicado en el capítulo 2

Paso 5: Contabilización del número de FSUs máximo utilizados entre los enlaces de la red N_{FSU}

Una vez se establecieron todas las peticiones de conexión se ingresa al Paso 6, esta se encarga de modificar la capacidad en función de P_o según se muestra a continuación:

Paso 6: N° de transpondedores no cumple con P_o .

Se evalúa P_b ; si $P_b > P_o$ se modifica la capacidad del sistema, en caso contrario se salta al Paso 7. Es posible que el número actual de transpondedores no sea suficiente para satisfacer la probabilidad de bloqueo umbral, si ese es el caso necesariamente el número de transpondedores tanto Tx como Rx debe ser incrementado en una unidad. Hecho esto el simulador vuelve a comenzar con todos los valores reiniciados excepto el valor actualizado de capacidad por transpondedores tanto Tx como Rx. El valor de capacidad D_{FSUmax} se mantiene intacto en cada actualización, es decir que conserva el mismo valor cada vez que el simulador se reinicie, dado que la capacidad de los enlace debe presentar las mismas condiciones en términos de nulidad de bloqueos por falta de FSUs, quedando como $C(Tx, Rx, D_{FSUmax})$. Luego se vuelve al Paso 2 y se realiza el proceso nuevamente.

Paso 7: N° de transpondedores cumple P_o .

Si el número de transpondedores actual cumple con la probabilidad de bloqueo umbral (una P_b menor a P_o), se procede a contabilizar el número de FSUs que se utilizaron para cumplir los requerimientos de petición de conexión entre los pares de nodos de la red. De este modo el valor de capacidad final se actualiza, quedando con el valor de transpondedores Tx y Rx que cumplió con la P_o y los N_{FSU} que se requirieron para las peticiones de conexión, quedando $C(Tx, Rx, N_{FSU})$. Una vez comprobada y procesada la condición de probabilidad de bloqueo umbral P_o la simulación concluye. El simulador entrega información de interés a partir de los valores de capacidad (número de transpondedores necesarios por nodo y número de FSUs utilizados en los enlaces).

Paso 8: Finalmente, el valor de capacidad es actualizado por los valores obtenidos en el Paso 6, quedando de ese modo como $C(Tx, Rx, N_{FSU})$.

3.3 Limitación del metodo

Este procedimiento supone una cantidad homogénea de transpondedores en cada nodo de la red, la cantidad máxima necesaria para no sobrepasar la probabilidad de bloqueo umbral (P_o). Esto en la realidad no necesariamente es así, dado que podría ocurrir que en algún nodo se ocupen menos transpondedores que el máximo obtenido considerando la totalidad de los nodos. Lo mismo ocurre con el número de FSUs, si bien por enlace se dispone de una capacidad elevada, el número de FSUs utilizados es el máximo que se utilizó en la red.

Si el procedimiento hubiese considerado una metodología que obtenga solo el número de dispositivos utilizados la limitación por probabilidad de bloqueo por falta de dispositivos de Tx y Rx no hubiese jugado un papel relevante, dado que sería 0. Si se combinara la reducción de dispositivos por P_o y con un procedimiento que limitara a solo los transpondedores usados en cada nodo el método sería aún más fiable, pero será dejado para trabajos posteriores.

Por otra parte, el algoritmo de dimensionamiento es para redes transparentes, (para ser redes transparentes no tienen que existir bloqueos por alcance), de modo que se tiene que asegurar con antelación que no considere alcances. Es decir que todos los enlaces posibles entre cada par de nodos se puedan realizar por alcance, por lo que los bloqueos estarán acotados por FSU o por transpondedores. La distancia máxima está dada por los sistemas de modulación por *bit rate*, por lo tanto las rutas más largas no pueden sobrepasar el máximo alcance dado por el formato de modulación, en caso contrario se tiene que utilizar otro método de dimensionamiento.

4 Resultados y análisis de simulación

En ésta sección se presentan los resultados obtenidos mediante simulación, los cuales serán ilustrados a través de gráficas para cada uno de los escenarios considerados en este trabajo.

4.1 Topología de red utilizada

Existen diversas topologías de red, tres de las cuales son utilizadas por diversos autores para realizar evaluaciones en redes ópticas DWDM [32], entre las cuales destaca *National Science Foundation Network* (NSFNet) [33].

Para realizar evaluaciones en el algoritmo RMLSA descrito en la sección anterior se utilizará la topología de red NSFNet. En la Figura 4-1 se tiene la red que se constituye por 14 nodos y 21 enlaces bidireccionales o 42 enlaces unidireccionales. Considerando las tres rutas más cortas para conectar cada par de nodos se obtiene que la ruta más corta es de 250 Km, la ruta más larga es de 9130 Km y el promedio de las rutas es alrededor de los 3000 Km.

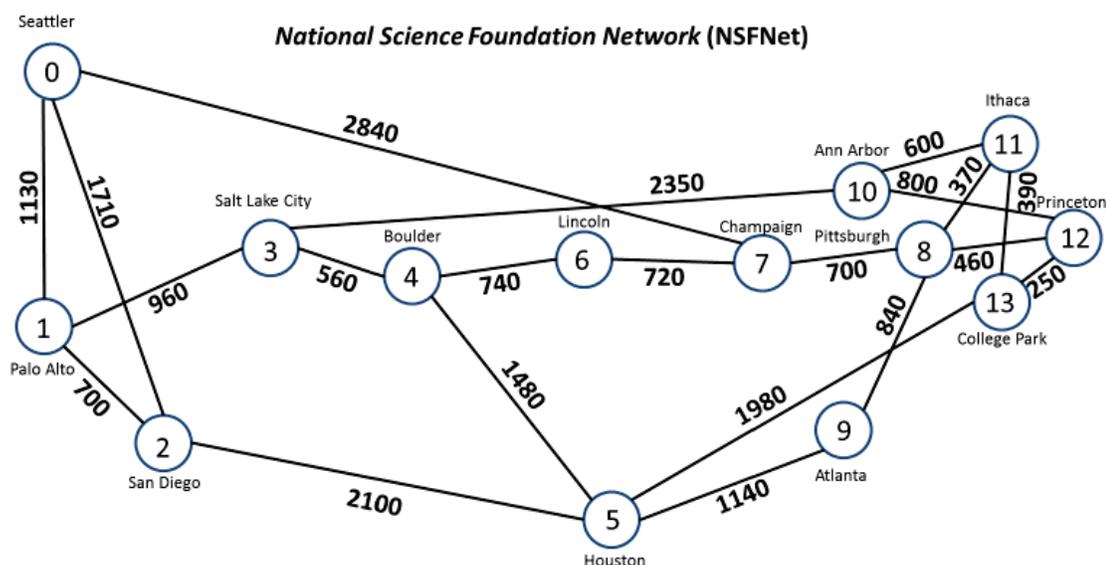


Figura 4-1: Topología de red en NSFNet, con sus respectivos largos en km.

4.2 Cantidad de peticiones de conexión

Considera el número de datos que se analizarán por el simulador, utilizándose 100.000 peticiones de conexión de las cuales el 1% (o 1000) no serán contabilizadas pues se requiere de estado estable para la obtención de resultados.

4.3 Capacidad de la red

Denotará el número de dispositivos y recursos ópticos a utilizar por la red, en función de no sobrepasar una probabilidad umbral P_o .

4.3.1 Cantidad de FSUs en cada enlace de la red

Para conceptos de simulación es necesario independizar el efecto de los bloqueos por falta de FSUs de los bloqueos por falta de transpondedores, por esto para tener resultados independientes entre sí se fija el número de FSUs en un valor elevado por fibra óptica para no obtener bloqueos por falta de recursos ópticos. Este valor se obtiene evaluando la utilización en FSU del formato de modulación más robusto y con menos eficiencia espectral de los utilizados en este proyecto (BPSK), verificando que los bloqueos por falta de FSUs sean cero. Por simulación se obtiene una utilización aproximada de 1000 FSUs, de modo que para asegurar bloqueos por falta de FSUs nulos se fija el valor en 2000 FSUs por enlace de fibra óptica.

4.3.2 Número de transpondedores

Va a ser el parámetro a controlar, dado que se dispondrá de una cantidad inicial de transpondedores lo suficientemente pequeña para que se obtenga de manera inicial una probabilidad de bloqueo alta. Con esto la simulación comprobará los resultados, aumentando 1 al número de transpondedores siempre y cuando la condición $P_b > P_o$ se cumpla. Al momento de no cumplirse la condición la simulación termina, mostrando en pantalla el valor final de transpondedores de transmisión y recepción usados por nodo.

En general, en el modelo de tráfico On-Off para que la probabilidad de bloqueo por falta de dispositivos no sea relevante en los resultados se debe considerar un número de transpondedores por nodo de $N-1$ tanto de transmisión como de recepción, donde N es el número de nodos de la topología de red a utilizar.

Ahora bien, considerando que en la sección 4.3.1 se definen los FSUs máximos por fibra de 1200, se consigue obtener el número de transpondedores mínimos a usar según la carga de tráfico que cumple con la probabilidad de bloqueo umbral P_o . Con esto se obtendrá un número de transpondedores mínimos, junto con el número de FSUs que se utilizaron a cada carga de tráfico.

4.4 Probabilidad de bloqueo umbral (P_o)

En capítulos anteriores se ha revisado que es la probabilidad de bloqueo (capítulo 1) y la obtención de su valor de forma algebraica (capítulo 3), ahora queda definir el valor numérico de

la probabilidad de bloqueo umbral, el cual servirá de comparación en cuanto a métricas deseables para el dimensionamiento.

Como criterio de comparación, la probabilidad de bloqueo umbral (P_o) se fijará en 10^{-3} , por lo que para los valores obtenidos de P_b se deberá cumplir la condición de $P_b < P_o$. De este modo, cumpliéndose la condición anterior se obtendrán valores de P_b del orden de los 10^{-4} .

4.5 Velocidades de transmisión digital disponibles

El contar con diversas velocidades de transmisión digital permite a la red adaptarse a los requerimientos de las fuentes de información (clientes), evitando una asignación excesiva de los recursos disponibles de la red. Los nodos fuente pueden solicitar conectarse al nodo destino con una de las seis posibles velocidades de transmisión digital descritas en la Tabla 4-1, las cuales presentarán una distribución que dependerá del escenario que se analice.

Tabla 4-1: Velocidades de transmisión en Gbps

N	Velocidad de transmisión (Gbps)
1	2.5
2	10
3	40
4	100
5	400
6	1000

4.6 Consideraciones del algoritmo RSA y requerimientos de espectro

La forma de solucionar el problema de asignación de rutas (R), y asignación de espectro (SA) en la propuesta de dimensionamiento de este trabajo se hace mediante algoritmos RSA, que resolverá de manera secuencial éstas 3 etapas. El algoritmo RSA utilizado es K-SP-MNA-FF, con $K = 3$ que representa las 3 rutas más cortas. En relación a la asignación del formato de modulación se opta por una estrategia no adaptativa (MNA), y finalmente la asignación de espectro se escoge la estrategia *First Fit* (FF). En estas tres elecciones se prioriza en que cada algoritmo escogido no presente una alta complejidad computacional, porque el dimensionamiento requiere tiempo para la obtención de la capacidad necesaria del sistema para no sobrepasar una probabilidad de bloqueo umbral. El hecho de por ejemplo considerar una ruta adaptativa, o una asignación de espectro como *Best Fit* aumentarían considerablemente el tiempo de procesamiento para obtener la capacidad necesaria de la red.

Como se mencionó anteriormente el algoritmo RSA utilizado es el denominado 3SP-MNA-FF descrito en el capítulo 2. Para dicho algoritmo es necesario disponer de tablas que resuman los requisitos de espectro necesarios en cada velocidad de transmisión digital y formato de modulación. De [30] se extrae que a medida que el formato de modulación aumenta en un bit por símbolo, la capacidad para transmitir por una sub-portadora aumenta en 12,5 Gbps. Además se presenta el alcance óptico en km, el cual se ve reducido a la mitad por cada aumento de bit por símbolo. Por lo tanto, para cada aumento de 3 dB en SNR (*Signal to Noise Ratio*), un bit adicional se puede añadir por símbolo (de QPSK en lugar de BPSK, 8QAM en lugar de QPSK, y así sucesivamente) [31], lo que queda expresado en la Tabla 4-1.

Para determinar la cantidad de sub-portadoras necesarias para cada velocidad de transmisión, se debe dividir cada velocidad de transmisión digital por la capacidad de sub-portadora en la Tabla 4-1, lo que queda representado en la Ec 4-1. Si SC es entero, se utiliza la Ec. 4-2, y si SC es decimal se utiliza la Ec. 4-3 para la obtención del número de FSUs que requerirá la petición de conexión.

$$SC = \frac{\text{Velocidad de transmisión [Gbps]}}{\text{Capacidad subportadora [Gbps]}} \quad (4-1)$$

En la Ec 4-3 la función parte entera representa la cantidad de FSUs equivalentes al número de sub-portadoras ópticas requeridas para conformar el canal óptico. Además, para que no exista solapamiento entre las señales ópticas se adiciona tanto en la Ec. 4-2 y 4-3 un 1, que representa la banda de guarda.

$$N^{\circ} FSU = SC + 1 \quad (4-2)$$

$$N^{\circ} FSU = [SC + 1] + 1 \quad (4-3)$$

Tabla 4-1: Capacidad de sub-portadoras y alcance máximo para diferentes formatos de modulación

Formato de modulación	Capacidad de sub-portadora [Gbps]	Alcance máximo [km]
64QAM	75	125
32QAM	62.5	250
16QAM	50	500
8QAM	37.5	1000
QPSK	25	2000
BPSK	12.5	4000

Tabla 4-2: Cantidad de FSU y banda de guarda requerida para cada velocidad de transmisión a formato de modulación BPSK

Bit Rate [Gbps]	Formato Modulación	FSUs	FSUs+GB	Espectro total [GHz]
2,5	BPSK	1	2	25
10	BPSK	1	2	25
40	BPSK	4	5	62,5
100	BPSK	8	9	112,5
400	BPSK	32	33	412,5
1000	BPSK	80	81	1012,5

Tabla 4-3: Cantidad de FSU y banda de guarda requerida para cada velocidad de transmisión a formato de modulación QPSK

Bit Rate [Gbps]	Formato Modulación	FSUs	FSUs+GB	Espectro total [GHz]
2,5	QPSK	1	2	25
10	QPSK	1	2	25
40	QPSK	2	3	37,5
100	QPSK	4	5	62,5
400	QPSK	16	17	212,5
1000	QPSK	40	41	512,5

Tabla 4-4: Cantidad de FSU y banda de guarda requerida para cada velocidad de transmisión a formato de modulación 8QAM

Bit Rate [Gbps]	Formato Modulación	FSUs	FSUs+GB	Espectro total [GHz]
2,5	8QAM	1	2	25
10	8QAM	1	2	25
40	8QAM	2	3	37,5
100	8QAM	3	4	50
400	8QAM	11	12	150
1000	8QAM	27	28	350

Tabla 4-5: Cantidad de FSU y banda de guarda requerida para cada velocidad de transmisión a formato de modulación 16QAM

Bit Rate [Gbps]	Formato Modulación	FSUs	FSUs+GB	Espectro total [GHz]
2,5	16QAM	1	2	25
10	16QAM	1	2	25
40	16QAM	1	2	25
100	16QAM	2	3	37,5
400	16QAM	8	9	112,5
1000	16QAM	20	21	262,5

Tabla 4-6: Cantidad de FSU y banda de guarda requerida para cada velocidad de transmisión a formato de modulación 32QAM

Bit Rate [Gbps]	Formato Modulación	FSUs	FSUs+GB	Espectro total [GHz]
2,5	32QAM	1	2	25
10	32QAM	1	2	25
40	32QAM	1	2	25
100	32QAM	2	3	37,5
400	32QAM	7	8	100
1000	32QAM	16	17	212,5

Tabla 4-7: Cantidad de FSU y banda de guarda requerida para cada velocidad de transmisión a formato de modulación 64QAM

Bit Rate [Gbps]	Formato Modulación	FSUs	FSUs+GB	Espectro total [GHz]
2,5	64QAM	1	2	25
10	64QAM	1	2	25
40	64QAM	1	2	25
100	64QAM	2	3	25
400	64QAM	6	7	87,5
1000	64QAM	14	15	187,5

Las Tablas 4-2 hasta 4-7 representan la cantidad de FSUs dependiendo del formato de modulación según las ecuaciones 4-2 y 4-3.

4.7 Factor de reducción

La función principal de este factor es reducir la distancia entre pares de nodos conectados de modo que no sobrepase el alcance máximo permitido por los formatos de modulación que se utilizan, esto permite tener un control en los bloqueos por alcance, dado que en éste trabajo se busca no tener influencia por bloqueos por alcance. En la Tabla 4-8 se presentan los factores de reducción de cada formato de modulación, para su obtención se utiliza el largo de ruta más larga en la topología NSFnet que es 9130 km, partiendo por el formato de modulación más robusto BPSK que posee un alcance máximo de 4000 km, obteniéndose que el factor de reducción necesario para cumplir con el alcance óptico es ≈ 0.4 . Desde ese factor se reduce a la mitad para el siguiente formato de modulación, y así sucesivamente según se muestra en la Tabla 4-8.

Tabla 4-8: Factor de reducción según el formato de modulación

Formato de Modulación	Factor de reducción
64QAM	0,0125
32QAM	0,025
16QAM	0,05
8QAM	0,1
QPSK	0,2
BPSK	0,4

El factor de red α va a variar entre 0.0125 y 0.4, asegurando de esta forma bloqueos nulos por alcance ante los diversos formatos de modulación soportados por la red.

4.8 Escenarios de simulación

Considerando el algoritmo 3SP-MNA-FF a distintas cargas de tráfico se generan resultados que corresponden al dimensionamiento por FSUs y por Transpondedores de transmisión y recepción a un factor de reducción que dependerá del formato de modulación.

Para los escenarios posteriores se considera:

- i) Corto plazo: Una red pensada si es que se implementara en los próximos años con las velocidades actuales de transmisión comercializadas actualmente. Se posee tráfico desde 2.5 a 100 Gbps, a probabilidad de ocurrencia uniforme, es decir 25% de ocurrir cada una, valores descritos en la Tabla 4-9.
- ii) Mediano plazo: Una red pensada en la incorporación paulatina de las velocidades de transmisión del futuro, con una probabilidad de ocurrencia baja a las nuevas velocidades. Se dispondrá de un tráfico no uniforme, con la desaparición de la velocidad de 2.5 Gbps que serán sustituidas por las de 10 Gbps, además de la incorporación de las velocidades 400 y 1000 Gbps. El rango de probabilidad de ocurrencia va desde los 40% hasta un 5% según la Tabla 4-9.
- iii) Largo plazo: Red pensada en el establecimiento de las conexiones de más alto bitrate, con probabilidad de ocurrencia uniformes. Las peticiones de conexión van desde los 10 hasta los 1000 Gbps según lo expresado en la Tabla 4-9, todas con la misma probabilidad del 20% cada una.

Tabla 4-9 Escenarios según su probabilidad de ocurrencia en el corto, mediano y largo plazo

Velocidades de transmisión digital	Corto plazo	Mediano plazo	Largo plazo
2.5 [Gbps]	25%	-	-
10 [Gbps]	25%	40%	20%
40 [Gbps]	25%	25%	20%
100 [Gbps]	25%	20%	20%
400 [Gbps]	-	10%	20%
1000 [Gbps]	-	5%	20%

La Figura 4-2 resume la cantidad de escenarios que se analizarán, teniendo por cada formato de modulación tres casos dependiendo si se encuentra en corto, mediano y largo plazo. En total serán 18 escenarios analizados, todos a un modelo de tráfico *On-Off* y topología de red NSFNet.

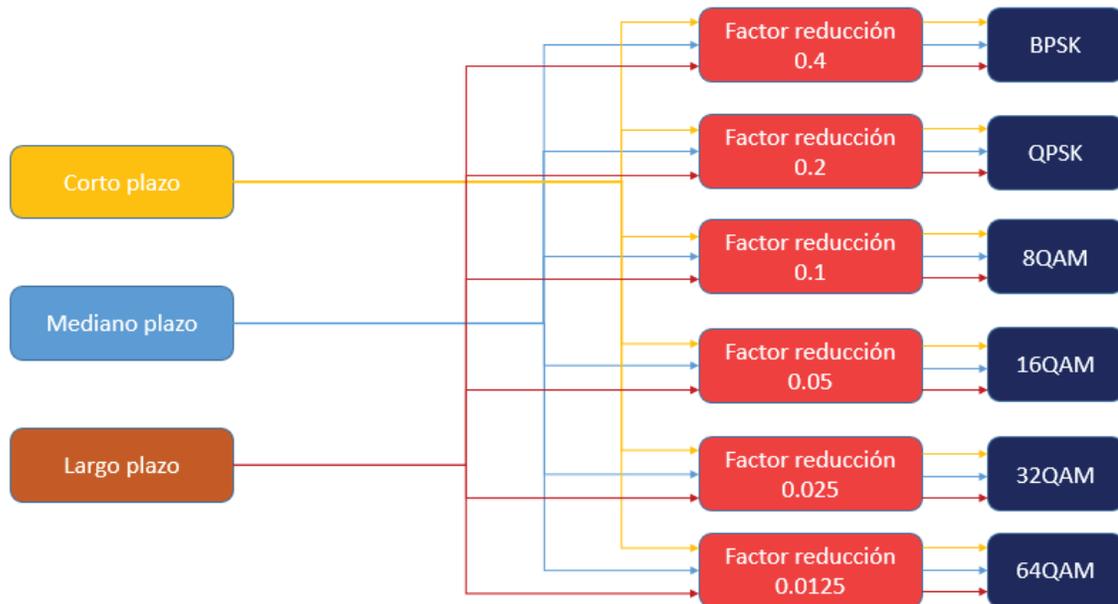


Figura 4-2: Resumen de los escenarios analizados.

4.9 Resultados dimensionamiento según el formato de modulación

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos por cada formato de modulación de los distintos escenarios, agrupados de la forma presentada en la Figura 4-2, en donde las gráficas de las Figuras 4-3 hasta la Figura 4-8 representan curvas a un formato de modulación específico y su representación en el corto, mediano y largo plazo.

4.9.1 Resultados a 64QAM

En este caso, a un formato de modulación fijo de 64QAM se aprecia la eficiencia espectral dado que es el que presenta mejor rendimiento en término de recursos utilizados.

Para la curva de corto plazo el número máximo de FSUs utilizados son 57 a una carga de tráfico de 0.9. Luego en la curva de mediano plazo su utilización fue de 138 FSUs, y finalmente la de largo plazo presenta una utilización máxima de 208 FSUs. En los tres casos ninguno sobrepasa la banda C (línea punteada amarilla) tal y como se aprecia en el Figura 4-3.

4.9.2 Resultados a 32QAM

En este formato de modulación, los resultados muestran que a corto plazo la curva es la misma que a 64QAM, y tienen el mismo nivel de utilización con 57 FSUs a carga de tráfico de 0.9.

A mediano plazo en cambio se tienen 153 FSUs máximos utilizados, presentando un incremento cercano al 11% en comparación con el formato de modulación revisado anteriormente.

A largo plazo se presenta una variación ligeramente mayor, dado que se utilizaron 234 FSUs, que en comparación con el formato de modulación revisado anteriormente el incremento fue cercano al 13%.

4.9.3 Resultados a 16QAM

Los resultados a 16QAM muestran que a corto plazo al igual que en 32QAM y 64QAM se mantiene la misma curva, presentando 57 FSUs a una carga de tráfico de 0.9 al igual que en los casos anteriores.

En mediano plazo se presenta una utilización de 177 FSUs, de manera que el incremento en comparación con el formato de modulación 32QAM es de un aproximado del 16%.

A largo plazo se utilizan 265 FSUs a una carga de tráfico de 0.9, que en comparación con el formato de modulación anterior el incremento llega alrededor del 13%.

4.9.4 Resultados a 8QAM

Los resultados a 8QAM (Figura 4-6), en comparación a los anteriores es donde se presenta el primer sobrepaso a la banda C (sobre los 320 FSUs).

En el corto plazo a diferencia que en los casos anteriores el número de FSUs aumenta, llegando a 73 FSUs a una carga de tráfico de 0.9, presentando un aumento del 28%.

A mediano plazo se llega a una utilización espectral máxima de 239 FSUs, que en comparación con 16QAM el aumento llegó a un 35%.

A largo plazo se puede observar en la Figura 4-6 que la curva sobrepasa la banda C sobre una carga de tráfico de 0.6, llegando a 348 FSUs a una carga de tráfico de 0.9. El incremento que presenta la curva de largo plazo es aproximadamente del 31% en comparación con 16QAM.

4.9.5 Resultados a QPSK

Los resultados a QPSK (Figura 4-7), similar a 8QAM presentan sobrepaso en la banda C en largo plazo, pero también se presenta sobrepaso en mediano plazo pero a una carga de tráfico de 0.9.

En corto plazo se tiene una utilización máxima de 85 FSUs, que en comparación con el anterior formato de modulación analizado presenta un incremento aproximado del 16%.

En el mediano plazo se presentan 333 FSUs a una carga de tráfico de 0.9, que en comparación con 8QAM el incremento aproximado es del 39%.

A largo plazo, al igual que en mediano plazo se sobrepasa la banda C, pero se presenta como máximo una utilización de 516 FSUs, que en comparación con 8QAM el incremento es de un aproximado de 48%.

4.9.6 Resultados a BPSK

En éste último caso se utiliza el formato de modulación con peor eficiencia espectral BPSK. Si bien es más robusto y permite un alcance mayor que los anteriores, en términos de FSU es el con peor desempeño en mediano y largo plazo.

A corto plazo utilizando el formato de modulación BPSK se obtienen 142 FSUs máximos a carga de tráfico 0.9, aumentando en un 67% el valor obtenido en QPSK.

En el mediano plazo solo es posible mantener la red hasta una carga de tráfico de aproximadamente 0.12, dado que posterior a eso la red sobrepasa la banda C y se dispara su utilización, llegando a carga de tráfico de 0.9 con 639 FSUs utilizados.

Finalmente a largo plazo se tiene que se puede mantener hasta una carga de tráfico de 0.01, dado que luego traspasa la banda C, llegando hasta un nivel de utilización en FSUs de 1014 a carga de tráfico 0.9, que equivale a un incremento aproximado del 96% en comparación a QPSK.

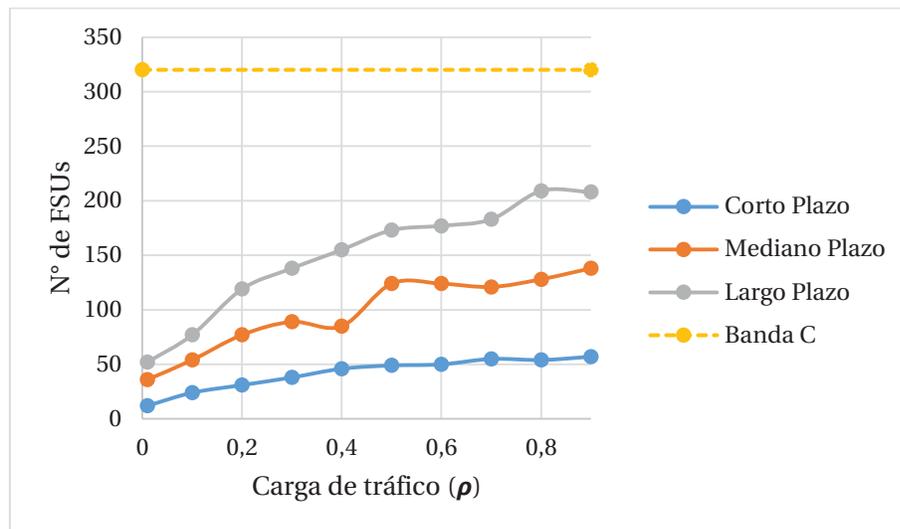


Figura 4-3: Resultados dimensionamiento a 64QAM.

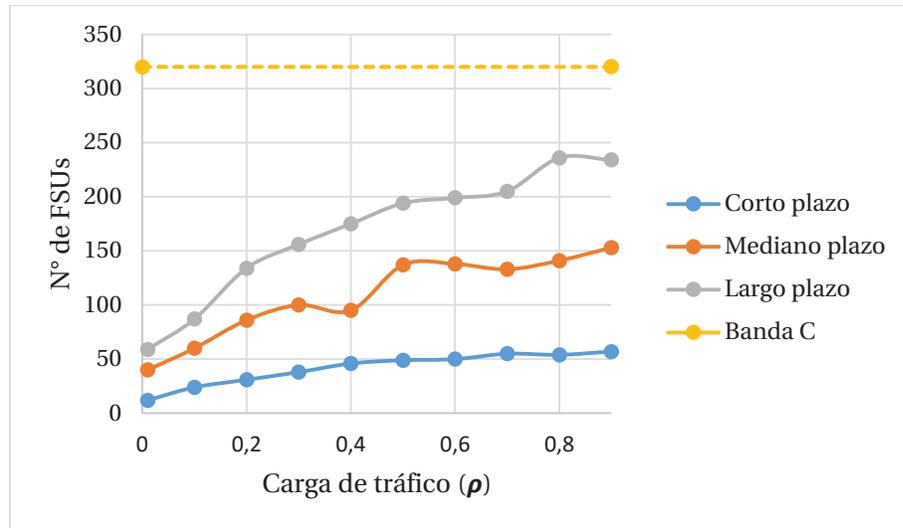


Figura 4-4: Resultados dimensionamiento a 32QAM

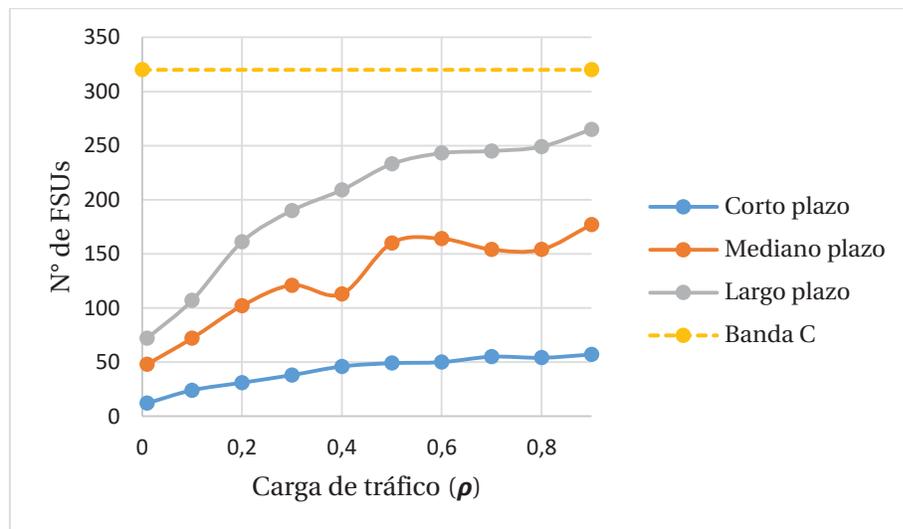


Figura 4-5: Resultados dimensionamiento a 16QAM

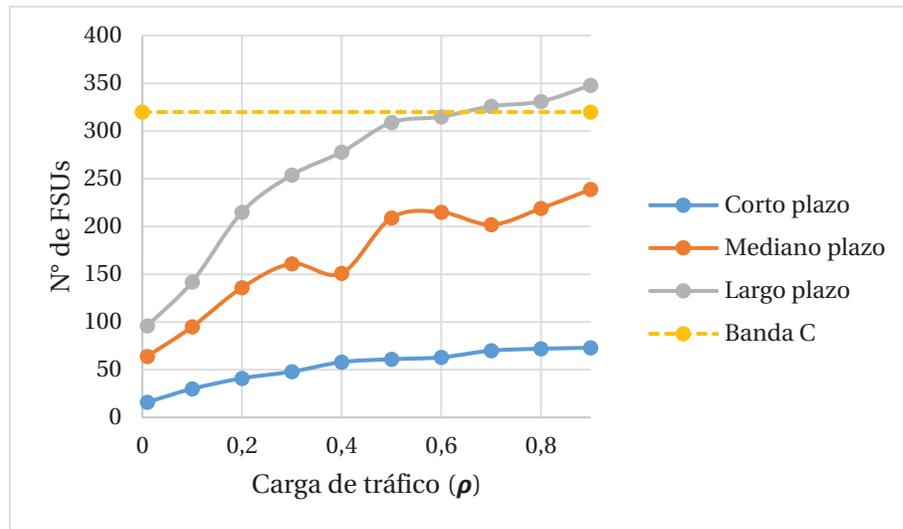


Figura 4-6: Resultados dimensionamiento a 8QAM

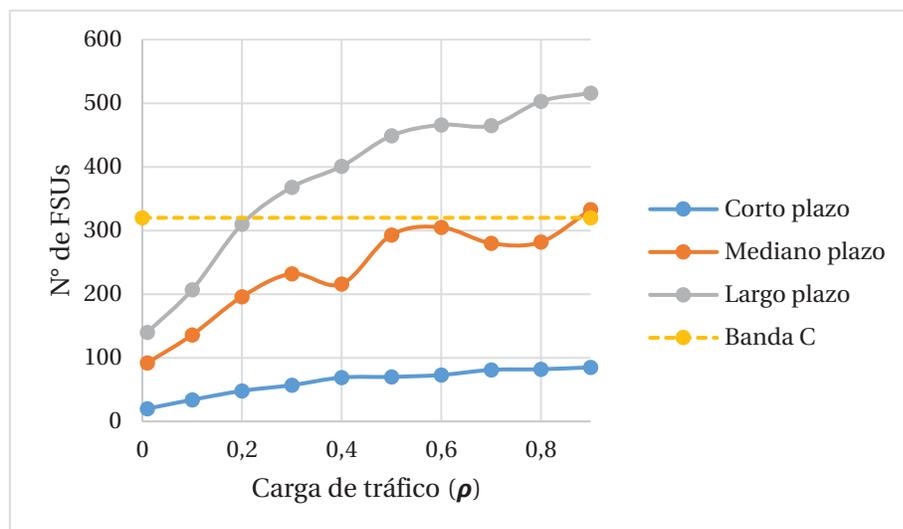


Figura 4-7: Resultados dimensionamiento a QPSK

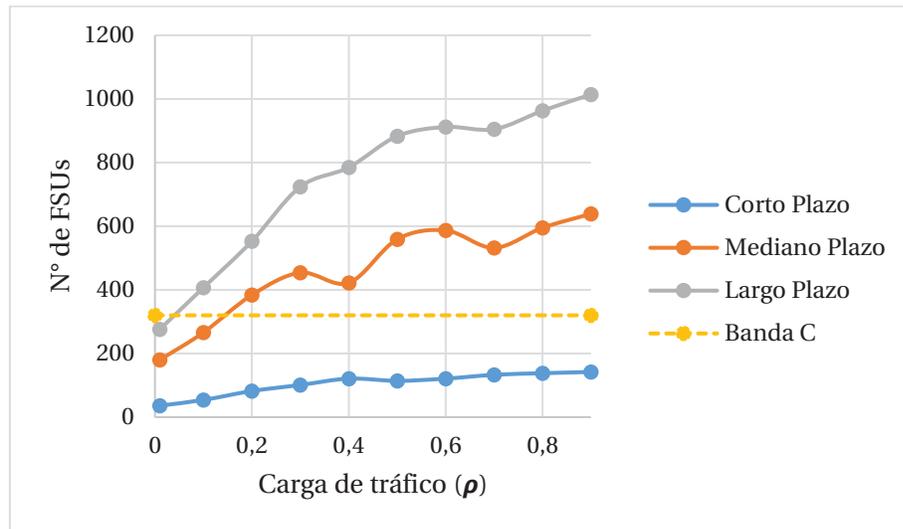


Figura 4-8: Resultados dimensionamiento a BPSK.

4.10 Resultados Dimensionamiento por Transpondedores

En esta sección se mostrarán los resultados por número de transpondedores en cada nodo de la red. Si bien éste resultado podría incorporarse de manera independiente en cada Escenario, los resultados son concluyentes:

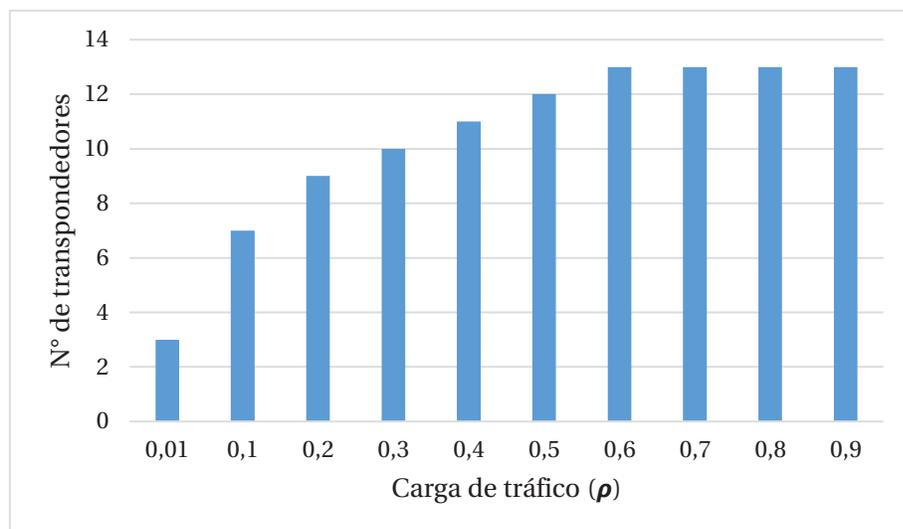


Figura 4-9: Dimensionamiento por transpondedores.

- A cada escenario analizado, la curva de dimensionamiento por transpondedores es la misma, es decir, la Figura 4-9 representa el número de transpondedores máximo por nodo, en cada uno de los 18 escenarios propuestos a diferentes cargas de tráfico.

El resultado es coherente con lo que se esperaba que ocurriera, dado que, al no poseer limitaciones en cuanto a alcance óptico y recursos ópticos (FSUs) en la red, el dimensionamiento por transpondedores no se ve afectado por otras probabilidades de bloqueo, obteniéndose de esta forma resultados independientes que solo dependen del número de dispositivos que cuente la red. Lo que implica que la única Figura 4-9 representa el dimensionamiento por transpondedores de cada uno de los escenarios analizados. En la Figura 4-9 las barras representan el número de transpondedores de transmisión y recepción a diversas cargas de tráfico en cada nodo presente en la red, llegando a 13 transpondedores desde una carga de tráfico de 0.6 en adelante.

4.11 Comparación de resultados del dimensionamiento

A modo de comparación se presentan los resultados obtenidos agrupados según el estado temporal en que se encuentre la red. En la Figura 4-10, Figura 4-11 y Figura 4-12 se presentan gráficas en el corto, mediano y largo plazo respectivamente, a cada formato de modulación.

En la Figura 4-8 se muestra los resultados a corto plazo de cada uno de los formatos de modulación utilizados. Como se aprecia, ningún formato de modulación sobrepasa la banda C, siendo el máximo valor obtenido a BPSK con 142 FSUs. En el corto plazo no se tiene problemas por falta de recursos ópticos, por lo que podría usarse el formato de modulación con menor eficiencia espectral (BPSK) sin problemas.

En la Figura 4-9 se muestran los resultados a mediano plazo de cada uno de los formatos de modulación utilizados. Como se observa en la curva de BPSK, sobre una carga de tráfico de 0,1 se sobrepasa la banda C. El formato de modulación que le sigue en eficiencia espectral (QPSK), a una carga de tráfico de 0.9 presenta 333 FSUs utilizados, por lo que este formato de modulación podría ser usado sin problemas hasta una carga de tráfico de 0.8, presentando 282 FSUs utilizados. Dependiendo del criterio del operador de red podría mantenerse el formato de modulación QPSK en un mediano plazo, aunque para asegurar no sobrepasar la banda C en todo el rango de carga de tráfico bastaría utilizar desde el formato de modulación 8QAM, el cual presenta 239 FSUs utilizados a una carga de tráfico de 0.9.

En la Figura 4-10 se muestran los resultados a largo plazo de cada uno de los formatos de modulación utilizados. Como se observa en la curva de BPSK, sobre una carga de tráfico de 0.01 se sobrepasa la banda C, por lo que usar el formato de modulación BPSK se vuelve ineficiente en el largo plazo. En QPSK a una carga de tráfico de 0.2 se tienen 310 FSUs utilizados, y a cargas de tráfico superiores a 0.2 se sobrepasa la banda C, por lo que tampoco es un formato de modulación viable por su baja eficiencia espectral presentada en el largo plazo. En 8QAM a una carga de tráfico de 0.8 se tienen 331 FSUs utilizados, por lo que podría ser usado sin problemas a cargas de tráfico inferiores de 0.7, presentando 315 FSUs utilizados a carga de tráfico de 0.6. Dependiendo del

criterio del operador de red podría mantenerse el formato de modulación 8QAM en un largo plazo, pero si se quisiera asegurar de no sobrepasar la banda C en todo el rango de cargas de tráfico, bastaría con utilizar desde el formato de modulación 16QAM, el cual presenta 265 FSUs utilizados a carga de tráfico de 0.9.

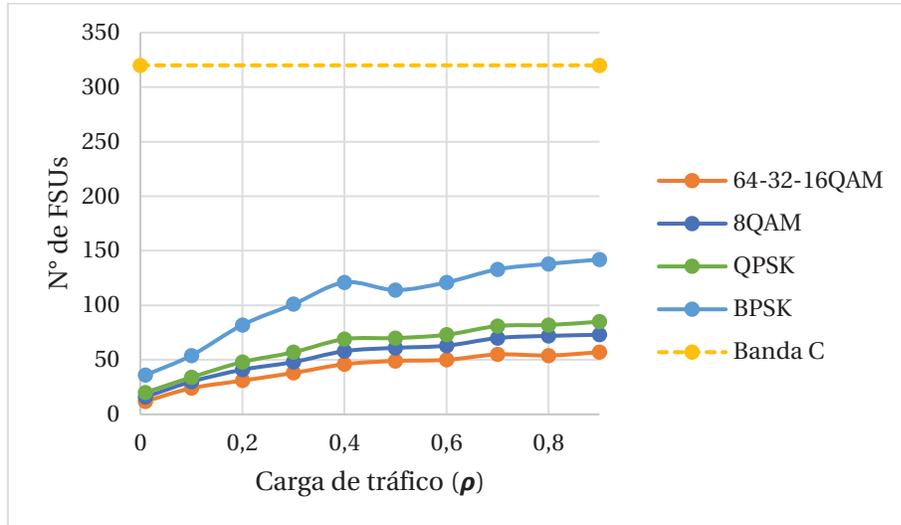


Figura 4-10: Resultados a corto plazo de cada formato de modulación.

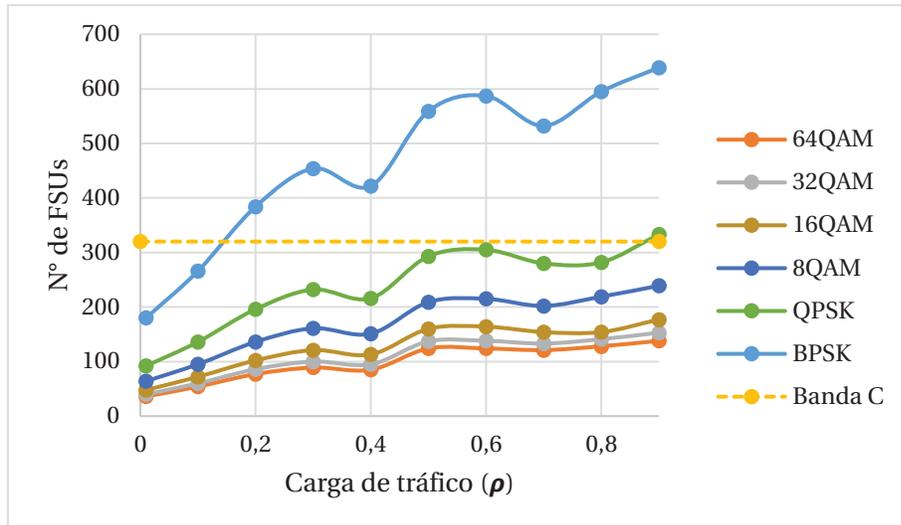


Figura 4-11: Resultados a mediano plazo de cada formato de modulación.

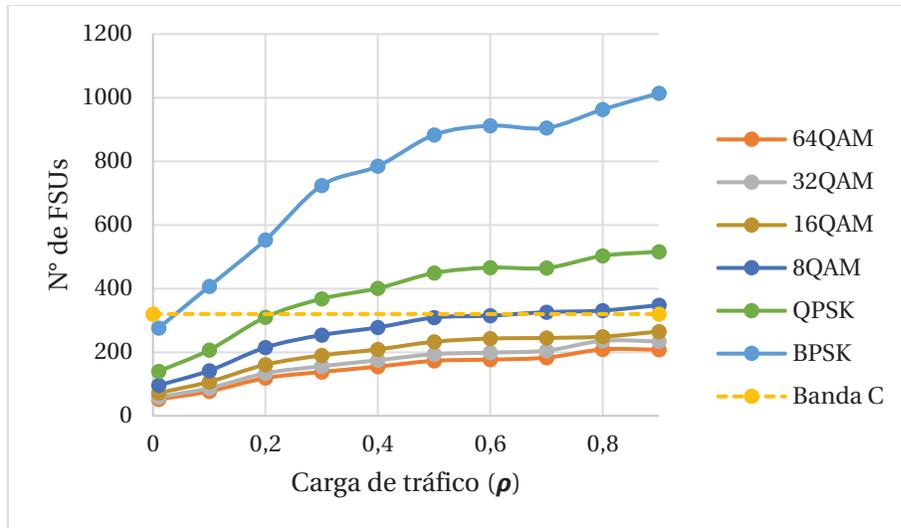


Figura 4-12: Resultados a largo plazo de cada formato de modulación.

5 Conclusiones

Las redes ópticas elásticas son una alternativa conveniente a tener en consideración para reemplazar al actual sistema de grilla fija, dada la tendencia del tráfico a seguir subiendo con demandas cada vez más heterogéneas., además de la eventual ineficiencia espectral que presenta el actual sistema por el espectro sin utilizar entre canales DWDM. Un método para mejorar la eficiencia del sistema es asignar el espectro de manera flexible, teniendo una relación directa entre la velocidad que se transmite y el espectro asignado a esa petición de conexión entre un par de nodos de una red.

En éste trabajo de investigación se ha dado una solución por medio de simulación del dimensionamiento de los dispositivos y cantidad de portadoras que generan los canales en la grilla flexible con establecimiento dinámico de conexiones.

El problema RSA genera tres tipos de bloqueos, uno relacionado con el alcance máximo, que al formato de modulación más robusto es de 4000 km, y en los casos de redes más grandes, como por ejemplo la NSFNet con factor de red 1 (alcance máximo 9130 km) no sería posible conectarse en ese par de nodos con el formato de modulación más robusto, por lo tanto para casos de análisis se utiliza un factor de reducción de red a cada formato de modulación para aislar este bloqueo, al igual de que se desea que con éste factor de reducción se cumpla con una red transparente (sin elementos de regeneración).

Otro tipo de bloqueo es el ocasionado cuando no existen suficientes FSUs continuos y contiguos en la ruta seleccionada, por lo que a fin de aislar su influencia en la probabilidad de bloqueo global se utiliza un número grande de ellos, específicamente 2000 FSUs para aislar su influencia y tener solo el efecto de los transpondedores en el sistema.

Finalmente otro tipo de bloqueo es el generado por falta de dispositivos, transpondedores de transmisión y recepción por nodo, por lo que para análisis se parte de un número pequeño de dispositivos, partiendo desde 1 dispositivos de Tx y Rx para encontrar el valor mínimo de dispositivos que cumplan con la probabilidad de bloqueo umbral.

Teniendo todos los ajustes realizados se dimensiona el número de dispositivos a cada carga de tráfico, desde 0.01 hasta 0.9, generándose curvas de dimensionamiento a distintos escenarios. De acuerdo a las gráficas se observa que en el corto plazo es posible mantener la red con formato de

modulación BPSK, con 142 FSUs utilizados, dejando libres 178 FSUs de la banda C para fines que estime el operador de red. En el mediano plazo con la incorporación de *bit rates* más altos se hace insuficiente el formato de modulación BPSK, pero con QPSK se utilizan 282 FSUs a una carga de tráfico de 0.8, por lo que dependiendo del criterio del operador de red podría mantenerse este formato de modulación hasta una carga de tráfico de 0.8. Finalmente, en el largo plazo tanto BPSK y QPSK son insuficientes para cumplir con la demanda de tráfico, por lo que se podría optar por 8QAM que presenta 315 FSUs utilizados a una carga de tráfico de 0.6, aunque si el operador de red quisiera cubrir cargas de tráfico mayores deberá optar por 16QAM que utiliza 265 FSUs a una carga de tráfico de 0.9. La curva de dimensionamiento por transpondedores en cada escenario analizado es el mismo, y solo varía según la carga de tráfico de la red, partiendo con un número de 3 de transmisión-recepción a carga de tráfico de 0.01, hasta el máximo que permite a tráfico *On-Off* de 13 transpondedores a una carga de tráfico de 0.9.

Ante los resultados obtenidos se recomienda que para no sobrepasar la banda C, en el peor de los casos (BPSK a largo plazo) utilizar cableado óptico multifibra de al menos ocho fibras ópticas entre par de nodos de manera unidireccional. Luego, si QPSK es el formato de modulación utilizado en largo plazo se debe utilizar cableado óptico multifibra de a lo menos cuatro fibras ópticas unidireccionales. Con 8QAM, sobre una carga de tráfico de 0.6 se sobrepasa la banda C, por lo que se recomienda utilizar cuatro fibras ópticas unidireccionales o bien un EDFA que le permita extenderse sobre la banda C, de este modo se utilizaría solo dos fibras ópticas unidireccionales. Recomendaciones validas en el barrido de cargas de tráfico hasta 0.9. En mediano plazo en cambio, con BPSK se requiere multifibra de cuatro fibras ópticas unidireccionales validas en el barrido de cargas de tráfico hasta 0.9, y con QPSK si el operador de red no requiere un funcionamiento sobre una carga de tráfico de 0.8, puede operar sin problemas con dos fibras ópticas unidireccionales, en caso contrario, dado que el sobrepaso en la banda C es mínimo (de 13 FSUs) puede agregar otro par de fibras ópticas entre par de nodos, o agregar un EDFA que le permita extenderse sobre la banda C.

Algo a tener en consideración es el efecto en FSUs que presentan los altos *bit rate*. La velocidad de transmisión digital de 1Tbps a modulación BPSK utiliza 81 FSUs, y una de 400 Gbps a una modulación de BPSK utiliza 33 FSUs. Queda en evidencia que su aumento en FSUs es más que el doble que una de 400 Gbps, específicamente 2.45 veces. El operador de red deberá tener en consideración eso al momento de implementar una red óptica flexible a altas tasas, una recomendación es limitar los formatos de modulación a tasas de 400 Gbps y 1Tbps por unos de mayor eficiencia espectral, eso permitiría tener un mejor desempeño a cargas de tráfico mayores.

Es necesario recordar que para efectos de dimensionamiento fue necesario aislar los efectos de insuficiencia de alcance óptico en la ruta de cada formato de modulación activando un factor de reducción. Además en NSFNet el largo de la ruta más larga es de 9130 km, por lo que aún si se utilizara el formato de modulación más robusto BPSK sería insuficiente para cubrir el alcance en rutas mayores a 4000 km de manera transparente.

Si bien en este informe se trata un método de dimensionamiento que genera una visión de la capacidad del sistema en distintas etapas de la red, existen temáticas no tratadas en este trabajo,

y que sería importante abordarlas en futuros trabajos. Una de ellas es mejorar el método, mantener la métrica de probabilidad de bloqueo umbral para limitar el uso máximo de transpondedores por nodo, pero combinarlo con el número de transpondedores que se usaron por nodo, porque aún limitados por P_o es posible que en algún nodo no se estén utilizando todos, eso permitiría obtener un número certero de transpondedores necesarios en la red.

Otra cosa a considerar en futuros trabajos es el utilizar otros algoritmos RSA presentes en la literatura (que por ejemplo incluyan ruteo adaptativo, o que ocupen otros algoritmos de asignación de espectro como *Best Fit* o *Bit Rate Aware Fit*), también modelos de tráfico de mayor complejidad (por ejemplo *Erlang-B*) o bien limitar los formatos de modulación utilizados por los *bit rate* más altos (400Gbps y 1Tbps) por unos de mayor eficiencia espectral, así reducir el número de FSUs y permitir una mayor cantidad de peticiones de conexión sin ser bloqueadas por insuficiencia de recursos ópticos. También sería interesante utilizar otras topologías de red que posean un mayor número de nodos y número de enlaces de fibra óptica, como por ejemplo la topología EON con 20 nodos y 78 enlaces unidireccionales, o ARPANet con 20 nodos y 62 enlaces unidireccionales, ambos casos presentan mayor número de nodos y número de enlaces que la topología NSFNet revisada en este trabajo, la cual presenta 14 nodos y 42 enlaces unidireccionales.

Bibliografía

- [1] R. Ramaswami y K. Sivarajan, «Optical Networks: A practical perspective,» Morgan Kaufmann, San Mateo CA, 2001.
- [2] T. Koonen, «Fiber to the Home/Fiber to the Premises: What, Where, and When?,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, nº 5, pp. 911-934, 2006.
- [3] ITU-T Recommendation G.694.1, «Spectral grids for WDM applications,» Ginebra, Suiza, 2012.
- [4] ITU-T Recommendation G709, «Interfaces for the optical transport network (OTN),» Ginebra, Suiza, 2012.
- [5] A. Eira, J. Pedro, J. Pires, D. Fonseca, J. Fernández-Palacios, V. López y S. Spaelter, «Defragmentation-Based Capacity Enhancement for Fixed to Flexible-Grid Migration Scenarios in DWDM Networks,» de *European Conference on Optical Communications (ECOC)*, London, 2013.
- [6] A. Saleh y J. Simmons, «Technology and Architecture to Enable the Explosive Growth of the Internet,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, nº 1, pp. 126-132, January 2011.
- [7] M. Jinno, H. Takara, Y. Sone, K. Yonenaga y A. Hirano, «Elastic Optical Path Network Architecture: Framework for Spectrally-Efficient and Scalable Future Optical Networks,» *IEICE Transaction on Communications*, vol. 1, nº 3, pp. 706-713, March 2011.
- [8] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord y S. J. Ben Yoo, «Elastic Optical Networking: A New Dawn for the Optical Layer?,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, nº 2, pp. 12-20, February 2012.
- [9] N. Charbonneau, A. Gadkar, B. H. Ramaprasad y V. M. Vokkarane, «Dynamic circuit provisioning in all-optical WDM networks using lightpath switching,» *Optical Switching and Networking*, vol. 9, nº 2, pp. 179-190, December 2011.

-
- [10] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone y S. Matsuoka, «Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, nº 11, pp. 66-73, November 2009.
- [11] «TeleGeography Submarine Cable Map,» [En línea]. Available: <https://www.submarinecablemap.com/>. [Último acceso: 2016 Octubre 2016].
- [12] J. S. Choi, N. Golmie, F. Lapeyrere, F. Mouveaux y D. Su, «A Functional Classification of Routing and Wavelength Assignment Schemes in DWDM networks: Static Casa,» de *Proc. VII International Conference on Optical Communication and Networks*, Nagoya, Japan, January 2000.
- [13] A. Leiva, «Metodología de Evaluación Tecno-Económica de Procesos de Migración en Redes WDM,» Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Doctorado en Ingeniería Electrónica 2013.
- [14] R. Ahumada, A. Leiva, F. Alonso, S. Fingerhuth y G. Farias, «Spectrum Allocation Algorithms for Elastic DWDM Networks on Dynamic Operation,» *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, nº 6, pp. 1012-1018, September 2014.
- [15] R. J. Essiambre y R. W. Tkach, «Capacity Trends and Limits of Optical Communication Networks,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, nº 5, pp. 1035-1055, May 2012.
- [16] M. Ruiz, L. Velasco, A. Lord, D. Fonseca, M. Pióro y R. Wessály, «Planning Fixed to Flexgrid Gradual Migration: Drivers and Open Issues,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, nº 1, pp. 70-76, January 2014.
- [17] A. Mayoral, V. López, O. González de Dios y J. P. Fernández-Palacios, «Migration Steps Toward Flexi-Grid Networks,» *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 6, nº 11, pp. 988-996, November 2014.
- [18] M. Tahon, S. Verbrugge, D. Colle, M. Pickavet, P. Wright y A. Lord, «Valuing Flexibility in the Migration to Flexgrid Networks,» de *National Fiber Optic Engineers Conference*, Anaheim, California, USA, 2013.
- [19] S. Fernandez Atienza, «Dimensionado y análisis tecno-económico de redes ópticas elásticas,» Trabajo de Máster en Ingeniería de Telecomunicación, Valladolid , Septiembre 2016.
- [20] V. López, Ó. Gonzáles de Dios, O. Gerstel, N. Amaya, G. Zervas, D. Simeonidou y J. P. Fernandez-Palacios, «Target cost for Sliceable Bandwidth Variable Transponders in a Real Core Network,» de *Future Network and Mobile Summit*, Lisboa Portugal, 2013.

-
- [21] J. López, Y. Ye y I. T. Monroy, «Energy efficiency analysis for flexible-grid OFDM-based optical networks,» *Computer Networks*, vol. 56, nº 10, pp. 2400-2419, July 2012.
- [22] N. Amaya, G. Zervas y D. Simeonidou, «Introducing node architecture flexibility for elastic optical networks,» *Journal of optical Communications and networking*, vol. 5, nº 6, pp. 593-608, June 2013.
- [23] K. Cristodoulopoulos, I. Tomkos y E. Varvarigos, «Routing and Spectrum Allocation in OFDM-based Optical Networks with Elastic Bandwidth Allocation,» de *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*, Miami, USA, January 2011.
- [24] K. Cristodoulopoulos, I. Tomkos y E. Varvarigos, «Elastic bandwidth Allocation in flexible OFDM based optical networks,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, nº 9, pp. 1354-1366, 2011.
- [25] G. Zhang, M. De Leenheer y B. Mukherjee, «Optical Grooming in OFDM-Based Elastic Optical Networks,» de *Optical Fiber Communication Conference*, Los Angeles, California, USA, March 2012.
- [26] N. Srinivas y C. Siva Ram Murthy, «Design and Dimensioning of a WDM Mesh Network to Groom Dynamically Varying Traffic,» *Photonic Network Communications*, vol. 7, nº 2, pp. 179-191, 2004.
- [27] N. Bouabdallah, G. Pujolle y H. Perros, «Multipoint-to-point lightpaths in all-optical networks: Dimensioning and cost analysis,» *Performance Evaluation*, vol. 65, nº 3-4, pp. 262-285, March 2008.
- [28] M. Tornatore, C. Rottondi, R. Goscien, K. Walkowiak, G. Rizzelli y A. Morea, «On the Complexity of Routing and Spectrum Assignment in Flexible-Grid Ring Networks,» *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, nº 2, pp. A256-A267, February 2015.
- [29] Averill M. Law y W. David Kelton, *Simulation modeling and analysis*, 3rd ed., McGraw-Hill Higher Education, 2000.
- [30] A. Tarhan y C. Cavdar, «Shared path protection for distance adaptative elastic Optical Networks under dynamic traffic,» de *5th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control System and Workshops (ICUMT)*, Almaty, 2013.
- [31] A. Bocoli, M. Schuster, F. Rambach, M. Kiese, C. Bunge y B. Spinnler, «Reach-dependent capacity in optical networks enabled by OFDM,» de *Optical Fiber Communication OFC*, San Diego, CA, 2009.

- [32] Y. Wang, J. Zhang, Y. Zhao, J. Liu y W. Gu, «Spectrum consecutiveness based routing and spectrum allocation in flexible bandwidth networks,» *Chinese Optics Letters*, vol. 10, n° 1, p. S10606, June 2012.
- [33] Y. Zhao, J. Zhang, J. Wang y W. Gu, «PCE-based routing and spectrum assignment in OFDM-based bandwidth-variable optical networks,» *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, pp. 116-122, April 2012.