



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DE  
VALPARAÍSO



**Vicente Alejandro Marín Garrao**

# Propuesta y Análisis de rendimiento de algoritmo RMLSA en redes ópticas flexibles de área extensa

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Electrónico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica  
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 14 de noviembre de 2017



# Propuesta y análisis de rendimiento de algoritmo RMLSA en redes ópticas flexibles de área extensa

Vicente Alejandro Marín Garrao

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 Edgardo Leiva Lopez  
Profesor Guía

Sra. Alejandra Liliana Beghelli Zapata  
Segundo Revisor

Sr. Sebastian Fingerhuth Massmann  
Secretario Académico

Valparaíso, 14 de noviembre de 2017

*A mi madre y a mi abuelita por su apoyo incondicional.*

# Agradecimientos

Agradezco el apoyo brindado por mi familia durante este largo periodo universitario, en especial a las constantes preocupaciones de mi abuelita.

También me gustaría agradecer a mi madre, que gracias a su esfuerzo, sacrificio y apoyo incondicional he podido ir cumpliendo cada una de las metas que me he propuesto. Por la paciencia que me ha tenido y principalmente por su coraje, por demostrarme que cada cosa que uno se proponga se puede cumplir siendo perseverante.

*Valparaíso, 14 de noviembre de 2017*

Vicente A. Marín Garrao

# Resumen

En este trabajo se propone un algoritmo RMLSA (*Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment*) para establecer conexiones en redes ópticas flexibles que cubran una amplia área geográfica. Para ello, y como se diferencia de los algoritmos RMLSA tradicionales, la propuesta permite el uso de regeneradores y/o convertidores de formato de modulación en nodos intermedios de rutas muy extensas. Por lo tanto, se espera que disminuya la probabilidad de bloqueo para peticiones de conexión.

Se desarrolló un simulador de eventos discreto que representa el proceso de reserva y liberación de recursos de conexiones en una red óptica flexible. Los parámetros de entrada a este simulador son: el algoritmo RMLSA, la carga de tráfico, la topología de red (con longitudes de enlace), los tipos de bits-rates y los formatos de modulación disponibles (con sus tablas de ancho de banda y alcance óptico) disponibles en los transpondedores y el número de regeneradores en los nodos.

Se obtuvo la probabilidad de bloqueo frente a la carga de tráfico experimentada por las topologías NSFNET y EON utilizando el algoritmo propuesto con hasta 12 regeneradores por nodo. A modo de comparación, también se simuló el caso de un algoritmo RMLSA tradicional (sin regeneración). Los resultados muestran que en todas las cargas de tráfico, la propuesta obtiene una menor probabilidad de bloqueo que la contraparte tradicional y con diferencias en un orden de magnitud (para cargas de tráfico bajas).

Palabras claves: Redes ópticas flexibles, formato de modulación, algoritmo RMLSA

# Abstract

In this paper we propose a RMLSA (Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment) algorithm to establish connections in flexible optical networks that cover a wide geographical area. For this, and as it differs from the traditional RMLSA algorithms, the proposal allows the use of regenerators and / or modulation format converters in intermediate nodes of very extensive routes. Thus, it is expected to decrease the blocking probability connection requests.

A discrete event simulator was developed that represents the process of reserving and releasing resource connections in a flexible optical network. The input parameters to this simulator are: the RMLSA algorithm, traffic load, network topology (with link lengths), bit-rates and modulation formats (with their bandwidth tables and optical reach) of the transponders and the number of regenerators in the nodes.

We obtained the blocking probability vs. traffic load experienced by the NSFNET and EON topology using the algorithm proposed with up to 12 regenerators per node. By way of comparison, the case of a traditional RMLSA algorithm (without regeneration) was also simulated. The results show that in all traffic loads, the proposal obtains a lower blocking probability than the traditional counterpart and with differences on an order of magnitude (low traffic loads).

Key words: flexible optical networks, modulation format, RMLSA algorithm.

# Índice general

Introducción.....	1
1 Redes Ópticas Flexibles .....	4
1.1 Redes WDM .....	4
1.1.1 Limitaciones.....	5
1.2 Redes Ópticas Elásticas .....	5
1.2.1 Red Óptica Elástica Estática .....	7
1.2.2 Red Óptica Elástica Dinámica .....	7
1.3 Arquitectura de redes ópticas elásticas.....	8
1.3.1 Conmutadores ópticos.....	8
1.3.2 Transpondedor flexible.....	9
1.3.3 Transpondedor flexible Sliceable (SBVT) .....	9
1.4 Características de Nodos .....	10
1.5 Arquitectura de Nodos .....	11
1.6 Algoritmos de asignación de recursos.....	14
1.6.1 Algoritmos de Enrutamiento .....	15
1.6.2 Políticas de asignación de espectro .....	16
1.6.3 Nivel de Modulación .....	19
1.7 Problemática .....	20
1.8 Pregunta de investigación .....	20
2 Propuesta algoritmo RMLSA con conversión intermedia de formato de modulación .....	21
2.1 Etapa A .....	21
2.2 Etapa B .....	23
2.3 Publicaciones .....	24
3 Parámetros, constantes y consideraciones para las simulaciones.....	26
3.1 Simulador .....	26
3.1.1 Evento de petición de conexión. ....	26
3.1.2 Evento de desconexión .....	27
3.2 Métricas de evaluación.....	27

---

3.2.1 Probabilidad de bloqueo (Pb) .....	27
3.3 Características de los escenarios de simulación .....	28
3.3.1 Velocidades de transmisión digital soportadas por la red .....	28
3.3.2 Requerimientos de espectro para cada velocidad de transmisión .....	29
3.4 Modelo de tráfico .....	30
3.5 Topologías de red.....	31
3.6 Factor de red.....	32
3.7 Distribución de probabilidad para los diferentes bit rates .....	32
3.8 Características de los nodos.....	32
3.9 FSUs disponibles en cada enlace.....	33
3.10 Escenarios de simulación.....	34
<b>4 Resultados y análisis de la simulación .....</b>	<b>35</b>
4.1 Escenarios en la red NSFnet.....	35
4.1.1 Definición de escenarios .....	35
4.1.2 Resultados de probabilidad de bloqueo general o global.....	35
4.1.3 Análisis de contribuciones.....	39
4.2 Escenarios en la red EON .....	41
4.2.1 Definición de escenarios .....	41
4.2.2 Resultados de probabilidad de bloqueo general o global.....	42
4.2.3 Análisis de contribuciones.....	45
<b>Discusión y conclusiones.....</b>	<b>48</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>50</b>

# Introducción

Actualmente, la tecnología DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) es la usada por los operadores de telecomunicaciones para sus redes de área amplia. Esto, debido que son la única tecnología capaz de soportar la creciente demanda de tráfico de datos [1]. Estas redes están compuestas por nodos y enlaces DWDM, donde es posible transmitir varias señales ópticas a longitudes de onda (o frecuencias) distintas para que puedan propagarse por una misma fibra óptica sin interferirse [1]. Estas señales modulan portadoras ópticas dentro de la banda C de comunicaciones ópticas (entre 1530 a 1565 nm).

La distribución de portadoras ópticas se realiza en base a una grilla fija, en donde la separación espectral entre cada una de ellas puede tomar valores de 200 GHz, 100 GHz, 50 GHz o 25 GHz, según la Rec. G.694.1 de la ITU-T. La separación espectral más usada comercialmente es la de 50 GHz.

Un gran monto de espectro no es usado, debido a que las señales no utilizan los 50 GHz de ancho de banda disponible para cada una de ellas. Esta ineficiencia del uso del espectro por parte de las redes DWDM con grilla fija limitaría el número máximo de conexiones simultáneas que se podrían transmitir por una misma fibra óptica.

Como solución a la ineficiencia de las redes ópticas de rejilla fija, en los últimos años se ha propuesto operar de manera flexible. En este novedoso tipo de operación, no existe una grilla con frecuencias pre-fijadas y la posición central de las señales se define según el ancho de banda de cada señal. Este tipo de redes se le denomina redes ópticas flexibles [1] [2].

En las redes ópticas flexibles, el espectro es dividido en pequeñas porciones denominadas FSU (*Frequency Slot Unit*) [3]. El valor ampliamente usado en la literatura para el ancho de banda de un FSU es igual a 12,5 GHz.

Para hacer efectiva la operación en redes flexibles se hacen necesarios dispositivos flexibles (transmisores sintonizables en frecuencia y formato de modulación, y conmutadores/filtros flexibles) y nuevos algoritmos de asignación de recursos para atender peticiones de conexión. Este trabajo trata sobre estos últimos, los cuales se denominan algoritmos RMLSA (*Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment*) [3].

Ante una petición de conexión a un bit-rate entre 2 nodos, los algoritmos RMLSA tienen la misión de determinar la ruta, el formato de modulación y la posición espectral de la señal óptica a establecer. Usualmente, estos algoritmos operan de manera secuencial, es decir, primeramente resuelven el problema del ruteo, posteriormente el del formato de modulación y finalmente, la posición espectral de la conexión [3].

El algoritmo de ruteo (RA) más usado en la literatura es el del tipo fijo-alternado, y en particular, el  $K$ -SP ( $K$ -Shortest Path o las  $K$ -rutas más cortas, donde  $K$  usualmente se encuentra entre 1 a 3) [3]. El algoritmo trata de establecer la conexión, intentando desde la ruta más corta hasta la  $K$ -ésima ruta más corta. El algoritmo de asignación de formato y/o nivel de modulación (MLA) más usado es aquel que resulte en el menor ancho de banda (menor número de FSUs) tal que su alcance sea igual o mayor al largo de la ruta. Finalmente, y teniendo la información del número de FSUs necesarias debido al MLA, se activa el algoritmo de asignación de la ubicación espectral (SA). El más usado es el *First-Fit* [3], el cual asigna los FSUs en la primera porción de espectro que encuentre disponible partiendo desde la parte más baja del espectro, tal que se cumplan las condiciones de continuidad (los FSUs asignados deben ser los mismos a través de toda la ruta) y contigüidad (los FSU deben estar juntos en el espectro).

Los algoritmos RMLSA buscan establecer una conexión óptica completamente transparente (sin regeneración intermedia) a través de una ruta que une los dos nodos que solicitaron transmisión de datos [3]. Sin embargo, esto es sólo posible para redes cuyos largos de rutas sean menores que los alcances de las señales. Para redes de gran extensión territorial, una conexión completamente transparente es casi imposible de realizar. Esto, por fenómenos ópticos como el ruido ASE (*Amplified Spontaneous Emission*), el cual deteriora la OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*) de las señales y como consecuencia, aumenta el BER (*Bit Error Rate*) a la salida de los receptores finales.

El rechazo a una petición de conexión para los algoritmos RMLSA se debe a la falta de FSUs continuas y contiguas en el espectro a través de las rutas candidatas y a la imposibilidad de establecer una conexión óptica transparente [4]. La primera causa es debido a la fragmentación del espectro (pequeños grupos de FSUs disponibles, aislados y no contiguos en el espectro en los enlaces de la red). La segunda causa es debido a que el alcance de la señal óptica es menor al largo de las rutas (redes de amplia cobertura geográfica). De esta forma, se hace necesario adecuar a los algoritmos RMLSA tradicionales para disminuir la tasa de rechazos de solicitudes de conexión.

En [5] se propone un algoritmo para establecer conexiones ópticas en la cual se busca escoger la alternativa con menor consumo energético tal que cumpla con un BER umbral y sin regeneración. En el caso de no poder establecer una conexión completamente óptica, el algoritmo selecciona un regenerador en algún nodo intermedio tal que minimice el consumo de energía eléctrica en toda la red. La propuesta fue evaluada en términos de probabilidad de bloqueo, consumo energético y aplicada a 2 topologías de red reales. Sin embargo, los regeneradores intermedios carecen de la capacidad de convertir el formato de modulación. En [6] se plantea un algoritmo para establecer redes virtuales sobre una red óptica flexible considerando un tráfico semi-estático. La finalidad de esta propuesta es minimizar el consumo energético y al ancho de banda usado. Sin embargo, no se analiza un escenario dinámico (en donde las conexiones se establecen

y liberen bajo demanda), y por lo mismo, no analiza el impacto de su propuesta en la tasa de rechazos (probabilidad de bloqueo). Dado los artículos analizados, en este trabajo se propone un algoritmo RMLSA con la capacidad de regenerar y convertir el formato de modulación en nodos intermedios de una ruta. Así, sería posible disminuir la tasa de rechazos debido a la falta de FSUs disponibles continuos y contiguos, y por problemas con el alcance óptico de las señales.

# 1 Redes Ópticas Flexibles

El tráfico en las redes de datos por fibra óptica ha tenido un crecimiento exponencial debido a la creciente demanda de información por parte de los usuarios finales, llevando a una saturación en la capacidad de las redes actuales [7]. Proyectando los sistemas de transmisiones ópticos a tasa superiores a los 400 Gbps para redes de largo alcance, no será posible mantener la tecnología WDM de rejilla espectral fija de 50 GHz, la cual permite transmitir en la actualidad tasas hasta los 100 Gbps [8].

## 1.1 Redes WDM

En la actualidad la tecnología de transporte óptica (OTN), utilizada en redes ópticas es la multiplexación por longitud de onda DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), es capaz de transmitir múltiples canales en una misma fibra basándose en portadoras de distintas longitudes de onda [9]. Esta tecnología también introduce una granularidad fija en el ancho de banda de los canales transportados a través de la fibra, limitada por la distancia entre las distintas portadoras a una longitud fija. La recomendación ITU-T G.694.1 [10], establece una serie de rejillas espectrales fijas, que dividen el espectro óptico relevante entre 1530 - 1565 nm (banda C), para el uso de DWDM, que van desde los 12,5; 25; 50 hasta los 100 GHz, aunque la más utilizada es la de 50 GHz. Además de la restricción del ancho espectral de cada canal, se debe considerar una banda de guarda, para evitar interferencia con canales adyacentes.

La Figura 1-1 muestra un diagrama de bloques con los componentes esenciales de un sistema DWDM para un enlace punto a punto [11]. Como en todo sistema de comunicaciones, existe un transmisor y un receptor, el medio de transmisión (en este caso es la fibra óptica) y además se emplea un multiplexor y un demultiplexor. Si es necesario pueden incluirse amplificadores ópticos para contrarrestar la atenuación de la señal cuando ésta viaja a través de la fibra óptica largas distancias, típicamente entre 40 y 80 km. Los más utilizados son los amplificadores EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) [12]. Este tipo de dispositivo es capaz de aumentar la potencia de todas las señales (en forma simultánea) que viajan a través de la fibra óptica. La amplificación se lleva a cabo en el dominio óptico, es decir que no es necesario convertir las señales ópticas en señales eléctricas.

### 1.1.1 Limitaciones

Como se mencionó anteriormente, la división del espectro correspondiente a la banda C en ranuras fijas, por lo general de 50 GHz, implica por un lado, que canales con una demanda más baja que la máxima soportada por la granularidad impuesta, infrutilicen recursos de la red. Y por otra parte, tasas de datos superiores a 100 Gbps, como los son 400 Gbps o 1 Tbps, no pueden ser transmitidas a largas distancias mediante una única portadora dentro de la rejilla de 50 GHz.

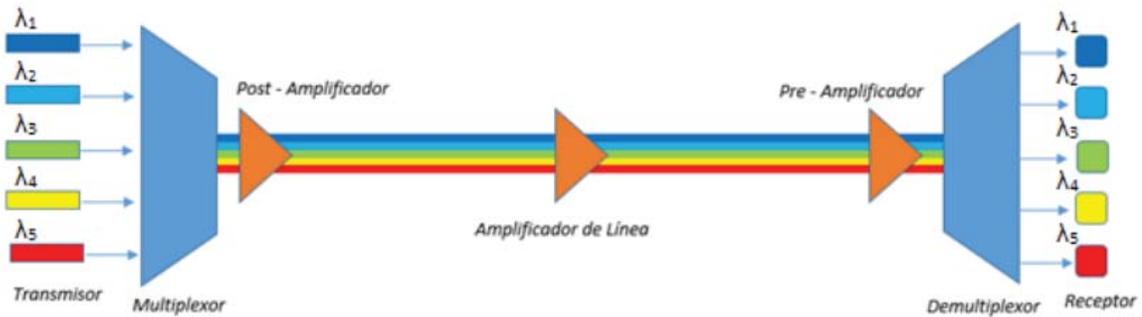


Figura 1-1: Diagrama de bloques básico de una red DWDM [11]

Estos dos factores, infrutilización de recursos en demandas pequeñas y limitación en la máxima velocidad impuesta por la rejilla fija, deben ser tomados en cuenta conjuntamente, ya que en la actualidad y en el futuro, el tráfico en la red es y será altamente heterogéneo por lo que la flexibilización en la disposición de los recursos de la red óptica es un reto ante el que la industria se enfrentará en los próximos años.

En la figura 1-2 se observa que, en efecto, la grilla fija de 50 GHz no es adecuada para transmisiones de 400 Gbps y 1 Tbps [2].

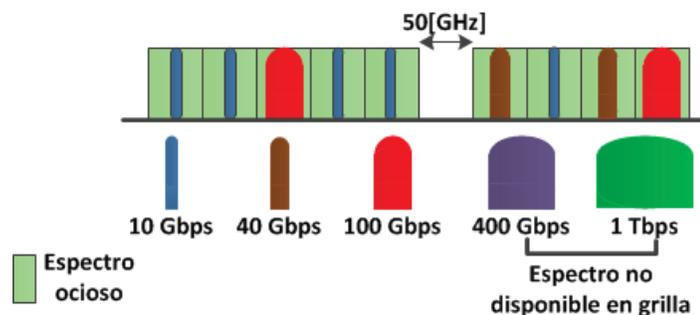


Figura 1-2: Ejemplo de asignación de canales en grilla fija de 50 GHz [2]

## 1.2 Redes Ópticas Elásticas

Las redes ópticas elásticas tienen la capacidad de dividir y asignar flexiblemente el espectro óptico en función de los requerimientos de cada demanda de tráfico [13]. Donde todo el equipamiento y el plano de control pueden manejar canales ópticos de ancho de banda variable, y cuyos elementos de conmutación (*Optical Cross Connects* - *OXC*s ó *ROADMs* [14]) pueden soportar distintas granularidades en la anchura espectral de los canales que transportan la información.

El primer cambio importante en la arquitectura de las redes ópticas elásticas es la sustitución de la rejilla fija por una nueva flexible. En la recomendación G.694.1 [10], además de presentar la rejilla fija, se ha hecho la modificación para la nueva rejilla flexible. La motivación principal es permitir que los sistemas de transmisión que emplean tasas y formatos de modulación mixtos puedan asignar ranuras de diferente ancho espectral para cada uno de los canales. De este modo, dichas ranuras pueden ser optimizadas para las necesidades de ancho de banda (de acuerdo a la tasa de transmisión y formato de modulación) de cada uno de los canales del sistema.

El espectro óptico de la banda C (1530–1565 nm) es dividido en ranuras de frecuencia, para ello, se establece una granularidad fina del espectro óptico, en donde a cada pequeño trozo de espectro se le denomina FSU (*Frequency Slot Unit*). La idea es asignar un grupo de éstos FSUs, espectralmente consecutivos, para satisfacer los diferentes requerimientos de las demandas de tráfico de datos [4]. El ancho de banda de cada FSU debe ser pequeño de un tamaño fijo (6,25; 12,5; 25; 50 GHz), y se asigna una frecuencia central (CF) a cada *Elastic Optical Path* (EOP) que debe coincidir con el principio o el final de estas ranuras. Así, la frecuencia central de cada portadora óptica está dada por:

$$\text{Central Frequency} = 193,1 \text{ THz} + n \cdot 0,00625 \text{ THz.} \quad (1-1)$$

Donde  $n$  es un entero positivo o negativo (incluyendo el 0).

El segundo concepto es el ancho de ranura (*Slot width*) que se mide en múltiplos de 12,5 GHz, el cual está dado por:

$$\text{Slot Width} = 12,5 \text{ GHz} \cdot m \quad (1-2)$$

Donde  $m$  es un entero positivo.

De esta manera se puede perfectamente definir un EOP mediante estos dos únicos valores  $n$  y  $m$ . En la figura 1-3 se muestra un ejemplo de rejilla flexible.

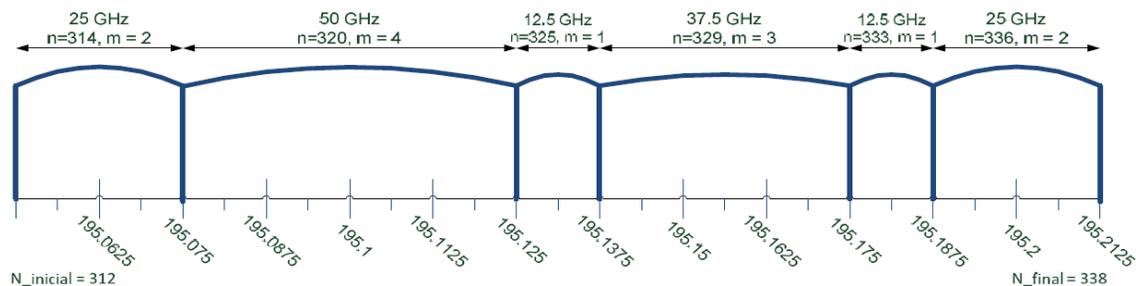


Figura 1-3: Ejemplo de asignación de canales en rejilla flexible [10].

Por otro lado, hay que tener en cuenta los elementos de la red que pueden hacer posible el despliegue de este tipo de redes. Ya se mencionó la necesidad de que los transpondedores (transmisores ópticos) sean capaces de transmitir señales de diferente tasa de datos, y asimismo sean capaces de transmitir diferentes formatos de señal. Esta última característica ofrece a los diseñadores de estas nuevas redes, la capacidad de adaptar el formato de la señal transmitida en

función de la relación señal ruido óptica (OSNR) requerida para la longitud del EOP que recorrerá dicha señal [14].

Sin embargo, queda por definir un modelo de nodo que integre por un lado los *Bandwidth Variable Transponders* (BV-T) y los *Bandwidth-Variable Wavelength Cross Connect* (BV-WXC), elementos de conmutación capaz de adaptar el ancho de banda de los filtros en función del ancho de banda del canal que los atraviese [15].

Cabe señalar que en las redes ópticas elásticas existen dos tipos de estados: Redes Ópticas Elásticas Estáticas y Redes Ópticas Elásticas Dinámicas.

### 1.2.1 Red Óptica Elástica Estática

Es aquella en donde una vez asignados los recursos para una conexión, ésta no varía con el paso del tiempo [16]. Es decir, los enlaces seleccionados son invariantes, aunque se esté enviando información por el camino o no. El problema que presenta un uso ineficiente de los recursos, debido a esta invariabilidad de la red. En la figura 1-4 se muestra un esquema que ejemplifica este tipo de red, se puede apreciar que en un tiempo  $t$  y en un instante posterior  $t + 1$  las mismas conexiones se encuentran establecidas (líneas segmentadas).

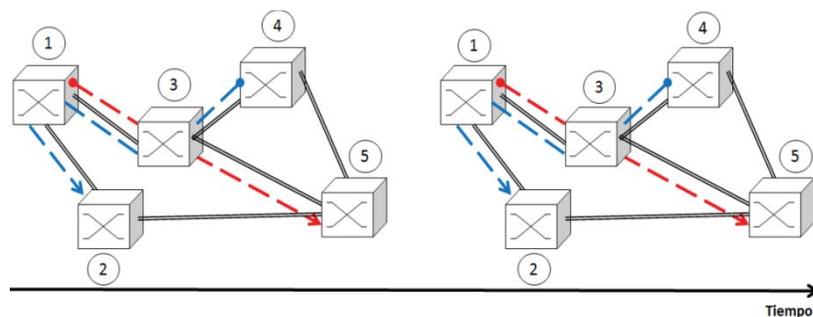


Figura 1-4: Esquema Red Óptica Elástica Estática [17].

### 1.2.2 Red Óptica Elástica Dinámica

Es en donde la red se va ocupando conforme las peticiones se van estableciendo, es decir, aquella red donde los recursos son liberados cuando estos no son utilizados, por lo tanto son variantes en el tiempo [18] [19] [20]. En la figura 1-5 se muestra un esquema que ejemplifica este tipo de red, se puede apreciar que en un tiempo  $t$  y en un instante posterior  $t + 1$ , los recursos son liberados para establecer nuevas conexiones (líneas segmentadas).

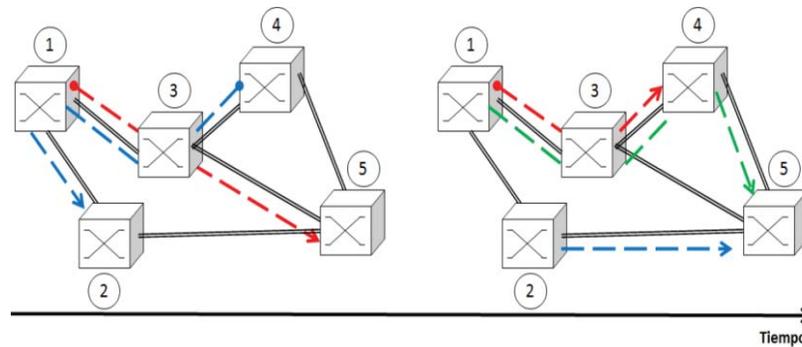


Figura 1-5: Esquema Red Óptica Elástica Dinámica [17].

### 1.3 Arquitectura de redes ópticas elásticas

En una red óptica elástica transparente, se requieren dispositivos flexibles de transmisión, recepción y conmutación de señales (además de los cables y fibras ópticas) [21] [22]. Las propuestas de conmutadores ópticos flexibles se basan principalmente en los denominados WSS (*Wavelength Selective Switch*), y deben tener la capacidad de dirigir un canal, con ancho de banda variable y cierta ubicación espectral, desde cualquier puerto de entrada hacia cualquier puerto de salida. Por otro lado, se tiene a los transpondedores flexibles, de transmisión y recepción, los cuales se encargan de generar y recibir las señales con ancho de banda variable (distintos *bitrates* y distintos formatos de modulación). A este tipo de dispositivos se les suele llamar *Bandwidth Variable Transponder* (BVT) [15].

A continuación, se describen las principales características, tecnologías y propuestas de dispositivos flexibles requeridos para construir una red óptica elástica:

#### 1.3.1 Conmutadores ópticos

La conmutación puede ser realizada de manera óptica, electrónica o como una combinación de ambas. La conmutación óptica se prefiere por sobre la conmutación electrónica, debido a que permite dirigir las señales sin la necesidad de realizar una conversión OEO (óptica-electrónica-óptica) y así, no es dependiente del *bit rate*.

Existen diferentes elementos y arquitecturas para desarrollar la conmutación óptica de las señales. Por ejemplo, mediante tecnología MEMS (*MicroElectroMechanical Systems*), que consiste de un gran número de pequeños espejos, los cuales son controlados electrónicamente. Otra tecnología, utilizada para construir este tipo de dispositivos es el cristal líquido sobre silicio o LCoS (*Liquid Crystal on Silicon*) [23]. Dispositivos con esta tecnología ya están siendo comercializados, por ejemplo, por la empresa Finisar. Los WSS basados en LCoS y fabricados en la actualidad, tienen la capacidad de ser reconfigurados remotamente y pueden conmutar señales con anchos de banda múltiples de 12,5 GHz [24]. Además, de permitir la conmutación de señales con ancho de banda variable, son retro compatibles con las grillas fijas de la Recomendación G.694.1 de la ITU-T. Esta cualidad, permite que los operadores de redes de telecomunicaciones

puedan adquirir estos dispositivos para ser utilizados en las actuales redes DWDM, y en un futuro puedan ser reutilizados en redes ópticas con operación elástica, mediante actualizaciones de software. En la Fig. 1-6 se ilustra la forma de operar de la tecnología LCoS. Básicamente, las señales ópticas inciden sobre una superficie de cristal líquido, la cual es polarizada para permitir que la luz, con una determinada frecuencia, se refleje sobre una superficie reflectante que la dirige hacia un determinado puerto de salida.

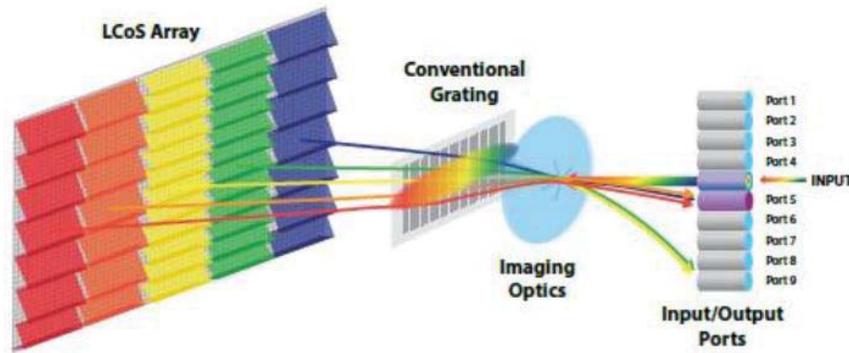


Figura 1-6 WSS con tecnología LCoS [23]

### 1.3.2 Transponedor flexible

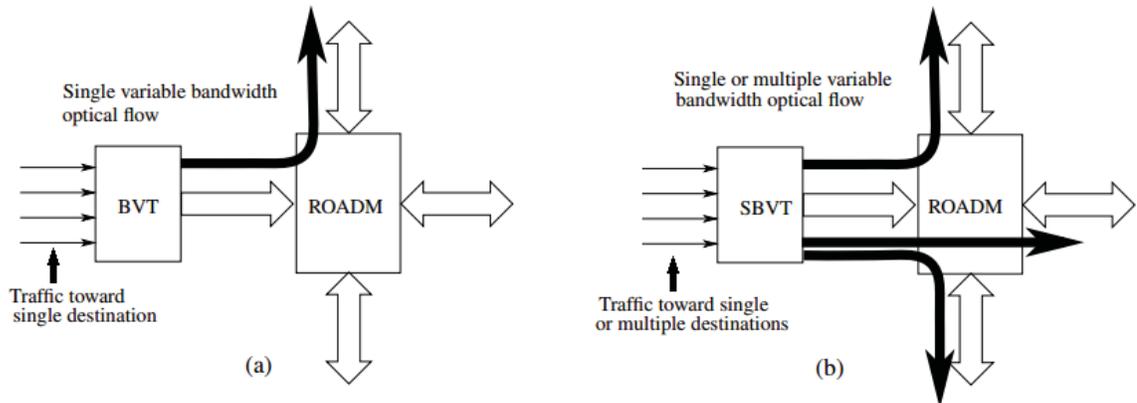
Los *Bandwidth Variable Transponders* (BVTs) [25] pueden generar y recibir señales con ancho de banda variable (por ejemplo, al utilizar múltiples sub-portadoras OFDM) [26]. También pueden operar con distintas velocidades de transmisión, longitudes de onda portadoras en la banda C, diversos formatos de modulación y alcance óptico. La arquitectura típica de este tipo de dispositivos consiste en un gran número de láseres sintonizables (uno por cada sub-portadora), cuyas señales son moduladas individualmente. A continuación, las sub-portadoras son agrupadas para que puedan viajar como una única entidad, a través de una fibra óptica.

Estos dispositivos se construirán como circuitos integrados [27], por lo cual, su tamaño y consumo de energía no sería un gran problema. En función de la cantidad de sub-portadoras que pueda generar un BVT, se tendrá una máxima velocidad a la cual es posible transmitir los datos. Este enfoque permite que un BVT sólo pueda ser asignado para establecer una conexión a la vez. Pero, si se tiene un BVT con una capacidad para transmitir hasta 1000 Gbps y es asignado para establecer una conexión a 100 Gbps, se estaría desperdiciando gran parte de la capacidad del transponedor. Con la intención de reducir los costos y el número de BVT requeridos para una red óptica elástica. Se ha propuesto un tipo de BVT denominado *Sliceable Bandwidth Variable Transponder* (SBVT).

### 1.3.3 Transponedor flexible Sliceable (SBVT)

Un *Sliceable Bandwidth Variable Transponder* (SBVT) [25] tiene la capacidad de enviar información a múltiples destinos, es decir, que puede establecer más de una conexión en forma simultánea. A excepción de la capacidad para comunicar un nodo fuente con varios nodos destino, un SBVT tiene las mismas cualidades que un BVT. Este mayor grado de flexibilidad

permitiría reducir el requerimiento de dispositivos y obtener ahorros importantes en término de costos y consumo energético [28]. También, se suele referir a este tipo de transpondedores como BVT virtualizables o multi flujo (*Multi-Flow*). La forma de operar de los SBVT consiste en que a partir un gran número de posibles sub-portadoras sintonizables, éstas se asignan en grupos para satisfacer diferentes demandas de tráfico [2]. Estos dispositivos podrían tener limitaciones en cuanto al máximo número de destinos simultáneos o simplemente puede asignar sub-portadoras a diferentes demandas hasta agotarlas todas. La Figura 1-7 ilustra la principal diferencia entre un BVT y un SBVT: la capacidad de establecer más de una conexión a la vez.



ROADM: Reconfigurable optical add-drop multiplexer  
 BVT: Bandwidth variable transponder  
 SBVT: Sliceable bandwidth variable transponder

Figura 1-7 a) BVT y b) SBVT [28]

## 1.4 Características de Nodos

Los nodos intermedios en una red óptica deben cumplir con dos funcionalidades básicas: enrutar el tráfico itinerante que atraviesa el nodo (a esto le llamaremos *Express Path Switching*) y añadir o extraer las longitudes de onda portadoras, o canales, que tienen como origen o destino el propio nodo (funcionalidad *Add/Drop*) [13].

Un *Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer* (ROADM) [15] es una arquitectura de nodo que combina estas dos funcionalidades mediante el uso de la tecnología *Wavelength Selective Switch* (WSS), que permite filtrar las longitudes de onda deseadas hacia cada fibra destino. Además, los ROADM incluyen una funcionalidad muy importante: la capacidad de ser reconfigurados remotamente. Esta característica es clave para la nueva generación de redes elásticas que se está proponiendo.

Los nodos elásticos se conforman principalmente por WSSs y BVTs, y se encargan de añadir, quitar y conmutar los canales ópticos [15]. La reconfigurabilidad es una característica importante para tener la suficiente flexibilidad para posibilitar una operación elástica. Los nodos elásticos deben tener las siguientes características: *Colorless*, *Directionless* y *Contentionless*. A continuación, se explica cada concepto o característica.

**Colorless:**

Deben permitir la incorporación de un transpondedor que transmita sub-portadoras en cualquier segmento del espectro (en la banda C), en cualquiera de sus terminales, es decir, que cualquier longitud de onda (color) pueda ser asignado a cualquier puerto de la etapa de *add/drop* [29] [30].

**Directionless:**

Los elementos de conmutación deben tener la capacidad de conmutar y direccionar las señales desde cualquier puerto de entrada a cualquier puerto salida, independiente de la dirección del flujo de información [29] [30].

**Contentionless:**

Debe permitir quitar la misma sub-portadora (longitud de onda) proveniente de cualquier puerto, 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. Esta característica permite múltiples copias de la misma longitud de onda en la etapa de *add/drop* [29] [30].

## 1.5 Arquitectura de Nodos

Se han diseñado varias arquitecturas para la construcción de nodos elásticos a partir de los WSSs (*Wavelength Selective Switches*). En la Arquitectura de Transmisión y Selección (*Broadcast-and-Select Architecture*) [15] presentada en la figura 1-8, se plantea el uso de divisores de señal en los N-1 puertos (o grados) de entrada para generar N copias de la señal original. Para el redireccionamiento, N-1 copias son dirigidas a los WSSs para llevar a cabo un proceso de filtrado con el fin de seleccionar el o los canales requeridos en cada puerto de salida. Por otro lado, las copias restantes se envían a una estructura de extracción/inserción por si dicha función es requerida. La desventaja de esta arquitectura es que el número de puertos a emplear está limitado por el uso de divisores de señal, debido a las pérdidas que introducen [14].

Otra propuesta similar, mostrada en la figura 1-9, lleva el nombre de Arquitectura de Encaminamiento de Espectro (*Spectrum Routing Architecture*) [15], en ésta los divisores de señal son reemplazados por WSSs 1xN, mismos que llevan a cabo las funciones de conmutación y filtrado. A diferencia de la arquitectura anterior, ésta no está limitada en número de grados, sin embargo, al requerir más WSSs su costo se incrementa [14].

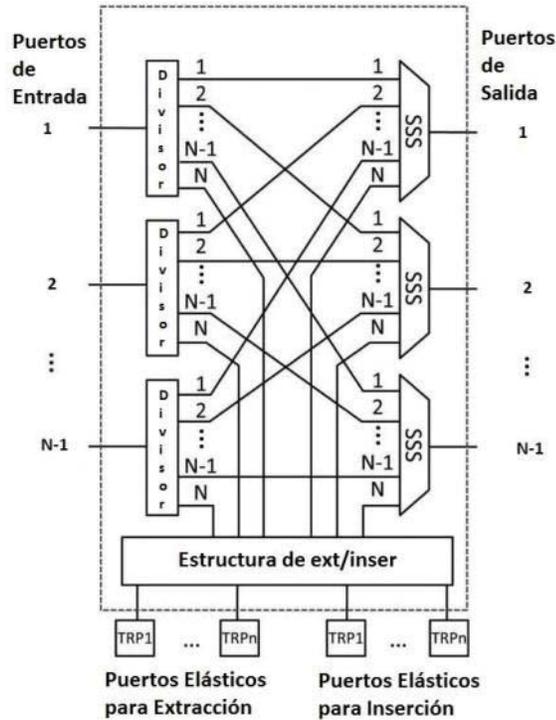


Figura 1-8 Arquitectura de Transmisión y Selección [15].

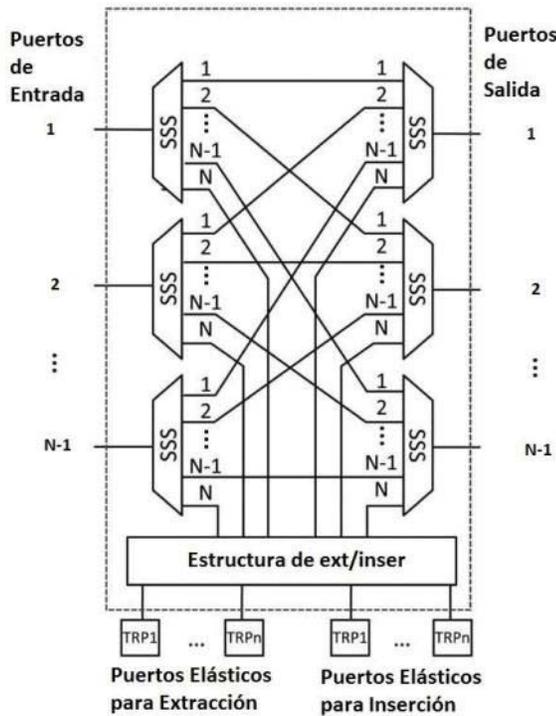


Figura 1-9 Arquitectura de Encaminamiento de Espectro [15].

La arquitectura de la figura 1-10 es conocida como Conmutación y Selección con Funcionalidad Dinámica (*Switch and Select with Dynamic Functionality*) [15], ésta es mucho más compleja que las anteriores. Los  $N-1$  puertos de entrada cuentan con un divisor de señal que genera  $N+P$  copias de la señal original. Se hace uso de un conmutador óptico para dirigir las copias de las señales de entrada a un WSS  $N+P \times 1$ , un módulo funcional  $f$ , o una estructura de extracción/inserción, según las necesidades. El módulo funcional provee de procesamiento adicional (desfragmentación de espectro, multiplexación por división de tiempo, regeneración, etc.) a las copias de las señales que son inyectadas a él. Las salidas del módulo están conectadas al WSS correspondiente para llevar a cabo un proceso de filtrado y tener sólo los canales necesarios en los  $N-1$  puertos de salida. Se pueden tener tantos módulos funcionales como sean necesarios, cada uno con una diferente tarea. La funcionalidad dinámica añadida hace que el número de puertos requeridos en el conmutador óptico sean demasiados y los de cada WSS se vean altamente incrementados en comparación con las arquitecturas antes presentadas [14].

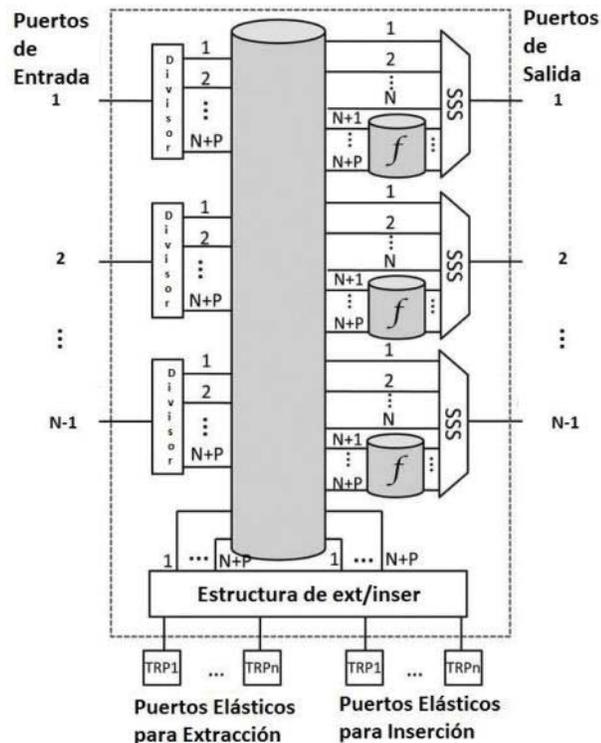


Figura 1-10 Arquitectura de Conmutación y Selección con Funcionalidad Dinámica [15].

Finalmente, es presentada una arquitectura con un grado de complejidad mucho mayor, pero capaz de proveer mayor flexibilidad que las arquitecturas previas. La Arquitectura bajo Demanda (*Architecture-onDemand, AoD*) [15], ilustrada en la figura 1-11, consiste en una “placa madre óptica”, por ejemplo un arreglo de MEMS, conectada a diversos módulos de procesamiento de señales (WSSs, conmutadores de gran velocidad, EDFAs, desfragmentadores de espectro, etc.), puertos de entrada y puertos de salida. La gran ventaja radica en la “placa madre óptica”, pues los módulos de procesamiento de señales no están cableados físicamente, por lo que permiten su

uso bajo demanda. Además, esta arquitectura presenta beneficios considerables en términos de escalabilidad [14].

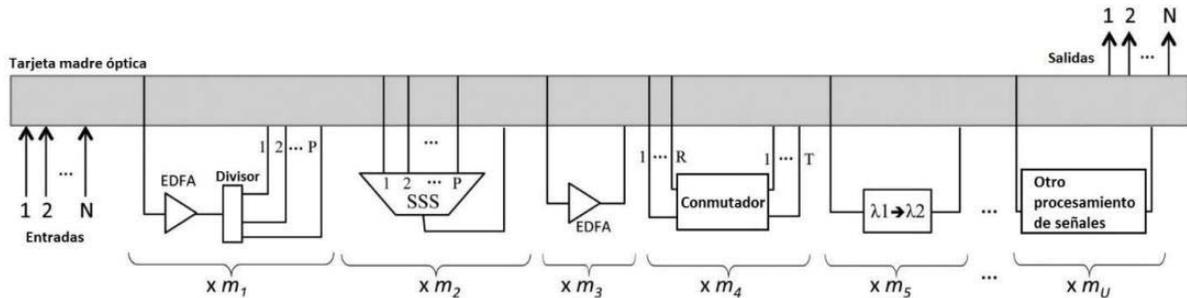


Figura 1-11 Arquitectura Bajo Demanda [15].

Todas las arquitecturas de nodo mencionadas tienen las características *Colorless* y *Directionless*, la característica de *Contentionless* va a depender de cómo se implemente la etapa de *Add/Drop* [31].

## 1.6 Algoritmos de asignación de recursos

La operación de redes ópticas flexibles requiere de otro tipo de algoritmos de asignación de recursos para establecer las conexiones ópticas entre dos nodos de la red. Como se mencionó el espectro es dividido en pequeñas porciones llamadas FSU (*Frequency Slot Unit*), donde el valor más usado es de 12,5 GHz. Estos algoritmos deben asignar una ruta y la posición espectral del número de FSUs requeridos.

Los algoritmos del tipo RMLSA (*Routing Modulation Level and Spectrum Assignment*) [3] [32] en los cuales los datos de entrada son los nodos fuente-destino y la tasa de transmisión requerida. Entregan una solución que consiste en una ruta, un formato de modulación y una ubicación espectral de la conexión a establecer [1]. Generalmente estos algoritmos operan de forma secuencial, resolviendo primero el problema de ruteo, luego el del formato de modulación y, finalmente, la asignación de la ubicación espectral de la conexión. Se debe notar que el par formato de modulación–tasa de transmisión define el número de FSUs requerida por la conexión óptica (ancho de banda de la señal óptica).

Los algoritmos RMLSA tradicionales buscan establecer una conexión óptica transparente a lo largo de una ruta, es decir, buscan establecer una conexión óptica con un formato de modulación determinado y una ubicación espectral constante a través de toda la ruta (condición de continuidad y contigüidad en el espectro).

Los FSUs asignados deben cumplir con tres restricciones [2], que son descritas a continuación.

- Continuidad del espectro: Se deben asignar los mismos FSUs en todos los enlaces que componen la ruta que conecta el nodo de origen con el nodo de destino. Esta restricción

puede ser eliminada si la red en cuestión posee dispositivos capaces de convertir el espectro (es decir mover una demanda a una posición diferente del espectro).

- Condición de asignación única: Un grupo de FSUs no puede ser asignado a dos o más demandas en un mismo enlace al mismo tiempo. El espectro sólo puede asignarse a una única demanda hasta que sea liberado. Una vez disponible puede volver a ser asignado a otras demandas.
- Contigüidad del espectro: Los FSUs deben ser asignados de manera consecutiva, es decir uno a continuación del otro [33].

### 1.6.1 Algoritmos de Enrutamiento

Entre los algoritmos de enrutamiento (RA), existen básicamente tres formas de abordar el problema, las cuales son: fijo, fijo alternado y adaptativo [34].

#### **Fijo:**

En el enrutamiento fijo (FR) [34], una única ruta fija es precalculada para cada par fuente-destino utilizando algún algoritmo de trayecto más corto, como el algoritmo de Dijkstra. Cuando una petición de conexión llega a la red, este algoritmo intenta establecer un *Spectrum path* a lo largo de la ruta fija predeterminada. Comprueba si los FSUs requeridos están disponibles en cada enlace de la ruta predeterminada o no. Si incluso un enlace no tiene los FSUs continuos y contiguos deseados, la solicitud de conexión se bloquea.

#### **Fijo Alternado:**

El enrutamiento fijo alternado (FAR) [35] es una versión actualizada del algoritmo FR. En FAR, cada nodo de la red mantiene una tabla de enrutamiento (que contiene una lista ordenada de un número de rutas fijas) para todos los demás nodos. Estas rutas se calculan fuera de línea. Cuando llega una petición de conexión con un par origen-destino dado, el nodo fuente intenta establecer un *Spectrum path* a través de cada una de las rutas desde la tabla de enrutamiento tomada en secuencia, hasta encontrar una ruta con la cantidad de FSUs requeridos. Si no se encuentra ninguna ruta disponible con los recursos requeridos entre la lista de rutas alternativas, la solicitud de conexión se bloquea. Aunque la complejidad de cálculo de este algoritmo es mayor que la de FR, proporciona una probabilidad de bloqueo comparativamente menor que este.

#### **Adaptativo:**

En el enrutamiento adaptativo (AR), las rutas entre pares fuente-destino se eligen dinámicamente, dependiendo de la información del estado de los enlaces de la red [36]. Dicha información está determinada por el conjunto de todas las conexiones que están actualmente activas. La forma más aceptable de AR es “*adaptive shortest path*”, que es muy adecuado para su uso en redes ópticas. Bajo este enfoque, cada espectro no utilizado en la red tiene un costo de 1 unidad, mientras que el costo de cada espectro utilizado en la red se toma como  $\alpha$ . Cuando llega

una conexión, se determina la ruta más corta entre un par origen-destino. Si hay varios caminos con la misma distancia, uno de ellos se elige al azar. En AR, una conexión se considera bloqueada principalmente cuando no hay ruta con la cantidad de FSUs requeridos entre el par origen-destino. También existe el denominado “*adaptive least congested path*”.

Dado que AR considera todas las rutas posibles entre pares fuente-destino, proporciona menor probabilidad de bloqueo de solicitudes de conexión, pero su tiempo de configuración es comparativamente mayor que otros algoritmos de enrutamiento. AR requiere un amplio apoyo de los protocolos de control y gestión para actualizar continuamente las tablas de enrutamiento en los nodos. AR se adapta a la implementación centralizada más que a la alternativa distribuida [37].

### 1.6.2 Políticas de asignación de espectro

Existen diversas estrategias para realizar la búsqueda y asignación de espectro, de las cuales se destacan los siguientes algoritmos:

#### First Fit (FF):

Este algoritmo realiza el proceso de búsqueda de FSUs consecutivos disponibles en una ruta candidata, desde el menor al mayor índice de numeración, y no se detiene hasta que se encuentre la cantidad de FSUs requerida o bien hasta que todos los FSUs hayan sido verificados [3]. En este último caso, si no existe otra ruta candidata se produce un bloqueo. Este algoritmo tiene un buen rendimiento, el cual se debe a que reserva los FSUs libres y consecutivos en el extremo superior del espectro.

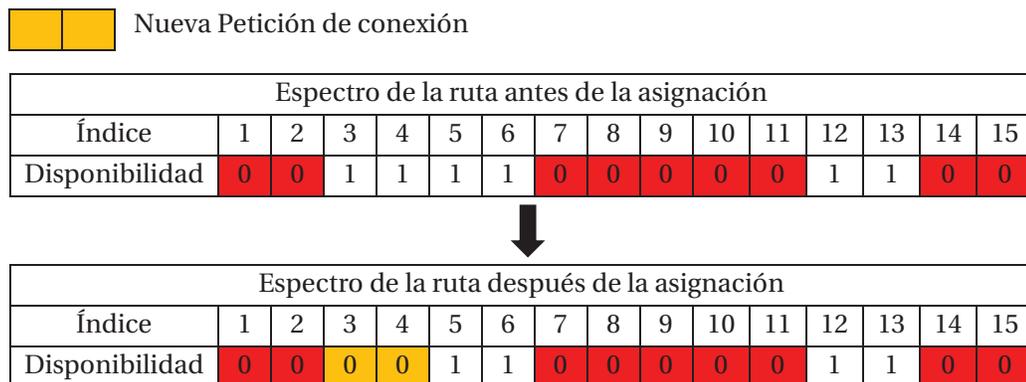
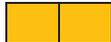


Figura 1-11 Ejemplo asignación de espectro usando FF.

#### Random Fit (RF):

Este algoritmo realiza la asignación de FSUs de manera aleatoria, generalmente, con distribución de probabilidad uniforme [3]. Luego de generar el vector de disponibilidad de FSUs en la ruta candidata, se buscan y se almacenan todas las posibilidades de asignación de acuerdo al espectro requerido y al disponible en la ruta. Seleccionando el espectro de manera aleatoria, puede reducir la posibilidad de múltiples conexiones eligiendo el mismo espectro que es posible si la asignación del espectro se realiza de una manera distribuida.

 Nueva Petición de conexión

Espectro de la ruta antes de la asignación															
Índice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Disponibilidad	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0

↓

Espectro de la ruta después de la asignación															
Índice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Disponibilidad	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0

Figura 1-12 Ejemplo asignación de espectro usando RF.

**Best Fit (BF):**

Verificar que la cantidad de FSUs consecutivos que tiene el bloque más grande es suficiente para atender la solicitud de conexión. Si la cantidad de FSUs de este bloque no es suficiente para satisfacer el requerimiento de espectro de la petición de conexión, se rechaza la solicitud de conexión a través de la ruta candidata [38]. Por otro lado, si el bloque más grande es suficiente para atender la petición de conexión, quiere decir que existe al menos un bloque factible para ser asignado. De ser así, se procede a buscar entre los bloques almacenados, un bloque que posea exactamente la misma cantidad de FSUs consecutivos que los requeridos por la petición de conexión. Si un bloque con estas características es encontrado, se asigna y se produce el mejor ajuste. Si existe más de un bloque que cumple con estas características, se asigna aquel que posea los FSUs con menor índice de numeración. *Best Fit* tiene como prioridad asignar un bloque que posea exactamente la misma cantidad de FSUs consecutivos disponibles que los requeridos por la petición de conexión. Si no existe un bloque con estas características, se elige por defecto el bloque más pequeño de entre aquellos que satisfacen el número de FSUs requeridos, y se asignan los primeros FSUs del bloque según el requerimiento de espectro de la petición de conexión.

 Nueva Petición de conexión

Espectro de la ruta antes de la asignación															
Índice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Disponibilidad	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0

↓

Espectro de la ruta después de la asignación															
Índice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Disponibilidad	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 1-13 Ejemplo asignación de espectro usando BF.

**Bit Rate Aware Fit (BRAf):**

De acuerdo a las velocidades de transmisión digital soportadas por la red, es posible realizar una clasificación en dos tipos de peticiones de conexión [38]. A un grupo se les denomina peticiones

de alta velocidad de transmisión digital, y entre ellas se puede considerar, por ejemplo, a todas las peticiones con velocidad de transmisión mayor a 100 Gbps, mientras que las peticiones que no cumplan esta condición son consideradas como peticiones de baja velocidad. El algoritmo puede proceder de dos maneras diferentes, según se trate de una petición de conexión alta o baja velocidad de transmisión digital. Si la petición es de alta velocidad de transmisión digital, el algoritmo BRAF comienza el proceso de búsqueda de FSUs de menor a mayor índice de numeración, se asignan los primeros FSUs consecutivos disponibles. En cambio, si la petición de conexión es de baja velocidad de transmisión digital, BRAF comienza el proceso de búsqueda de mayor a menor índice de numeración, por lo tanto, en este caso se asignan los últimos FSUs consecutivos disponibles.

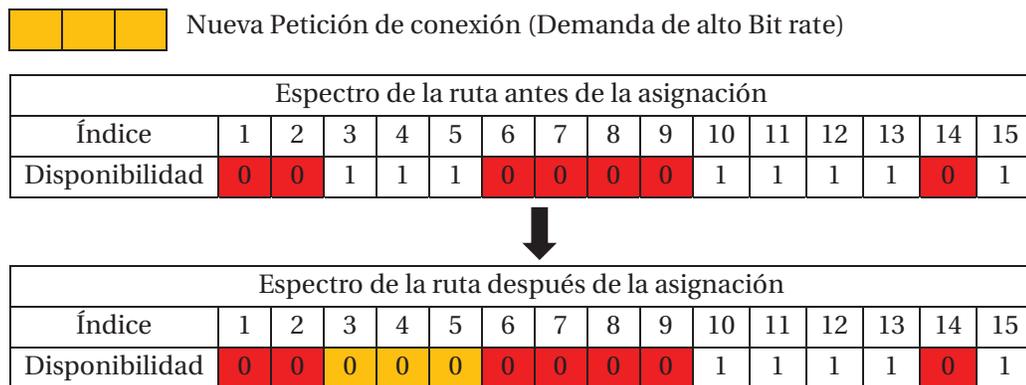


Figura 1-11 Ejemplo asignación de espectro usando BF.

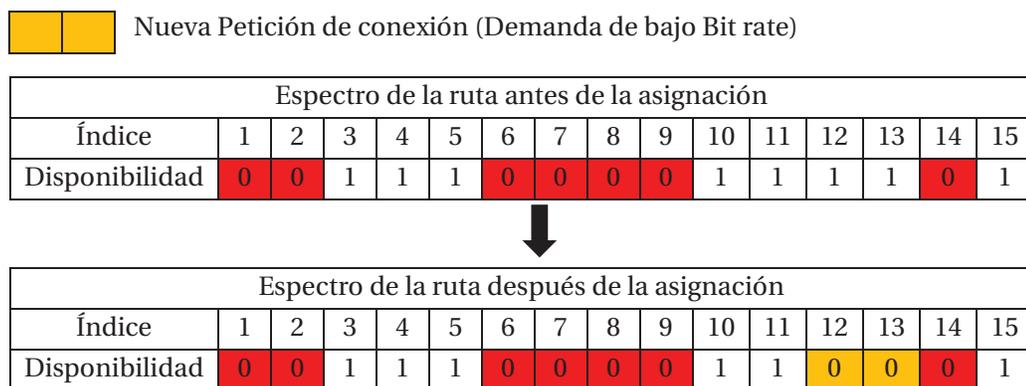


Figura 1-14 Ejemplo asignación de espectro usando BF.

### Otros Algoritmos de asignacion de espectro:

**Last Fit (LF):** Esta política siempre intenta elegir los FSUs con mayor índice de numeracion y los asigna al *spectrum path* para servir la solicitud de conexión. Cuando se completa la solicitud de conexión, los recursos se liberan [3].

**First-last Fit (FLF):** En esta política, todos los FSUs de cada enlace pueden dividirse en varias particiones. *First-last Fit* siempre intenta elegir los FSUs con menor índice de numeración de la partición de números impar de la lista de FSUs disponibles. Para las particiones de número par, intenta elegir los FSUs con mayor índice de numeración disponibles [3]. Se espera que con *First-last Fit* proporcione más FSUs disponibles alineadas contiguas que las políticas de asignación aleatoria y de ajuste inicial.

**Least Used (LU):** Asigna un espectro a un *spectrum path* a partir de una lista de FSUs disponibles que han sido utilizadas por el menor número de enlaces de fibra en la red [3]. Si varios FSUs disponibles comparten el mismo uso mínimo, se utiliza *First Fit* para seleccionar bloque de FSUs. La selección del espectro de esta manera es un intento de extender la carga uniformemente a través de todo el espectro.

**Most Used (MU):** Asigna espectro a un *spectrum path* a partir de una lista de FSUs disponibles, que han sido utilizadas por la mayoría de los enlaces de fibra en la red [3]. De forma similar a *Least Used*, si varios bloques de FSUs disponibles comparten el mismo uso máximo, se utiliza *First Fit* para seleccionar la mejor. La selección de los FSUs de esta manera es un intento de realizar una reutilización máxima del espectro en la red.

**Exact Fit (EF):** A partir del comienzo del canal de frecuencia, *Exact Fit* busca el bloque exacto disponible en términos del número de FSUs solicitadas para la conexión [3]. Si hay un bloque que coincide con el tamaño exacto de los recursos solicitados, esta política asigna ese espectro. De lo contrario, el espectro se asigna al bloque con el número de FSUs más cercano (mayor) al solicitado. Al seleccionar las ranuras de espectro de esta manera, podemos reducir el problema de fragmentación en las redes ópticas.

### 1.6.3 Nivel de Modulación

Existen dos modos de asignar un formato de modulación a una petición de conexión, la modulación fija y la adaptativa [39]. Los esquemas de asignación de espectro basados en modulación fija no consideran la técnica de modulación más apropiada para diferentes peticiones de conexión de acuerdo con su distancia de trayecto. Normalmente, seleccionan, de forma conservadora, una técnica de modulación para todas las solicitudes de conexión independientemente de su distancia de trayecto. Como ejemplo, un esquema de asignación de espectro basado en modulación fija adopta el formato de modulación BPSK para todas las peticiones de conexión independientemente de su distancia de *spectrum path*. Como resultado, este tipo de esquemas de asignación de espectro no utiliza eficientemente el espectro.

Por otro lado, los esquemas de asignación de espectro basados en la modulación adaptativa [40], determinan la técnica de modulación que mejor se adapte a cada distancia de trayecto [41]. Como ejemplo, un esquema de asignación de espectro basado en la modulación adaptativa adopta BPSK para *spectrum path* de larga distancia, y 16-QAM para *spectrum path* de corta distancia. Esto minimiza el número de ranuras de espectro que deben asignarse, lo que genera una mejor utilización de los recursos del espectro en comparación con los esquemas de asignación de espectro basados en la modulación fija.

## 1.7 Problemática

Los algoritmos RMLSA descritos solucionan en gran parte la optimización de recursos en una red óptica flexible, pero ¿qué pasa si las distancias entre algunos pares de nodos (no vecinos) superan los alcances de los pares *bit rate* - formato de modulación disponibles en los transpondedores de la red? ¿Qué pasa si existe espectro disponible en un tramo de la ruta, pero en el otro tramo hay menos (distinto de cero) y no es posible establecer una conexión con un formato de modulación común en toda la ruta?

El rechazo a una petición de conexión para los algoritmos RMLSA tradicionales se debe a dos causas. La primera de ellas es por la falta de disponibilidad de FSUs continuas y contiguas en el espectro a través de una ruta completa, como se observa en la Figura 1-15 (línea azul). La segunda causa se debe a que el alcance óptico de la señal óptica es menor al largo de la ruta candidata para establecer la conexión (línea roja).

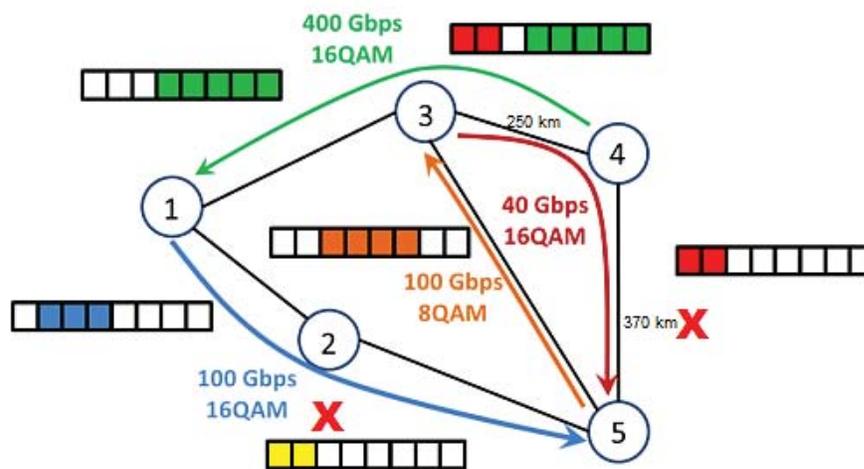


Figura 1-15 Ejemplo de rechazo de peticiones de conexión.

## 1.8 Pregunta de investigación

Este trabajo de título tiene como objetivo dar respuesta a la siguiente pregunta:

**En una red óptica flexible con operación dinámica ¿Cómo se ve afectado el rendimiento (probabilidad de bloqueo) al incluir la capacidad de realizar una conversión del formato de modulación o una regeneración de la señal, en algún nodo intermedio?**

La distribución del contenido de este trabajo es la siguiente: En el capítulo 2 se presenta la propuesta de algoritmo RMLSA; En el capítulo 3 se detallan los parámetros y variables necesarias para la simulación; En el capítulo 4 se presenta el análisis de los resultados obtenidos mediante la simulación, además de comparar el algoritmo propuesto respecto al algoritmo RMLSA tradicional, por último, se presentan las conclusiones.

## 2 Propuesta algoritmo RMLSA con conversión intermedia de formato de modulación

El algoritmo RMLSA propuesto utiliza: un algoritmo de ruteo del tipo  $K$ -SP; para la asignación de formatos de modulación busca la opción que obtenga el menor número de FSUs tal que su alcance óptico iguale o supere el largo de la ruta analizada y para el algoritmo de asignación de espectro, la propuesta puede funcionar con cualquiera de los presentados ampliamente en la literatura. En la Figura 2-1 se muestra un esquema general del algoritmo RMLSA propuesto.

A grandes rasgos, el algoritmo busca establecer conexiones de manera transparente, a través de cualquiera de las rutas preestablecidas. De no ser posible, se intenta establecer conexiones mediante un solo conversor/regenerador intermedio. De no ser posible esto, la solicitud de petición es rechazada.

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se confeccionaron 2 artículos. Los que se presentaron en 2 conferencias.

Ante una petición de conexión entre un par de nodos ( $s$  al  $d$ ) considerando una tasa de transmisión  $B_{s,d}$ , el algoritmo opera en 2 etapas (A y B).

### 2.1 Etapa A

En esta etapa se analiza la factibilidad de establecer la solicitud de conexión dentro de alguna de las  $K$ -ésimas rutas más cortas y de manera transparente (completamente óptica). Para comprender la operación de la etapa A se definen los siguientes términos:

- $s$  es el nodo fuente.
- $d$  es el nodo destino.
- $B_{s,d}$  es la tasa de transmisión solicitada entre nodos  $s$  al  $d$ .
- $\beta = \{B^1, B^2, \dots, B^u, \dots, B^U\}$  es el conjunto compuesto por las  $U$  tasas de transmisión disponibles en los transpondedores flexibles, donde  $B^u$  representa el  $u$ -ésimo elemento.
- $\mathcal{M} = \{M^1, M^2, \dots, M^j, \dots, M^J\}$  es el conjunto compuesto por los  $J$  formatos de modulación disponibles en los transpondedores flexibles, donde  $M^j$  representa el  $j$ -ésimo elemento.

- $\mathcal{R}_{s,d} = \{R_{s,d}^1, R_{s,d}^2, \dots, R_{s,d}^k, \dots, R_{s,d}^K\}$  es el conjunto compuesto por las  $K$  rutas candidatas (precalculadas) entre los nodos  $s$  al  $d$ , donde  $R_{s,d}^k$  representa la  $k$ -ésima ruta más corta.
- $\mathcal{L}_{s,d} = \{L_{s,d}^1, L_{s,d}^2, \dots, L_{s,d}^k, \dots, L_{s,d}^K\}$  es el conjunto de los largos, en km, de las rutas del conjunto  $\mathcal{R}_{s,d}$ , donde  $L_{s,d}^k$  representa el largo de la  $k$ -ésima ruta más corta.
- $\mathcal{FM}(L_{s,d}^k, B_{s,d})$  es el conjunto de formatos de modulación pertenecientes a  $\mathcal{M}$  que, en conjunto con la tasa de transmisión  $B_{s,d} \in \beta$ , tienen un alcance óptico mayor o igual a  $L_{s,d}^k$ .
- $\mathbb{FSU}[\mathcal{M}, \beta]$  es una matriz donde cada elemento  $\mathbb{FSU}[m, b]$  contiene el número de FSUs (ancho de banda) que se obtienen de la combinación entre el formato de modulación  $m$  y una tasa de transmisión  $b$ ,  $\forall m \in \mathcal{M}$  y  $b \in \beta$ .
- $\mathbb{U}(R_{s,d}^k)$  es el vector de disponibilidad de FSUs de la ruta  $R_{s,d}^k$ . El número de elementos de este vector está dado por el número total de FSUs de una fibra óptica.
- $\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(R_{s,d}^k)]$  es el conjunto de FSUs disponibles y contiguos en el espectro en el vector  $\mathbb{U}(R_{s,d}^k)$ .
- $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(R_{s,d}^k)]\|_{\max}$  es el número máximo de FSUs contiguos y disponibles en el vector  $\mathbb{U}(R_{s,d}^k)$ .

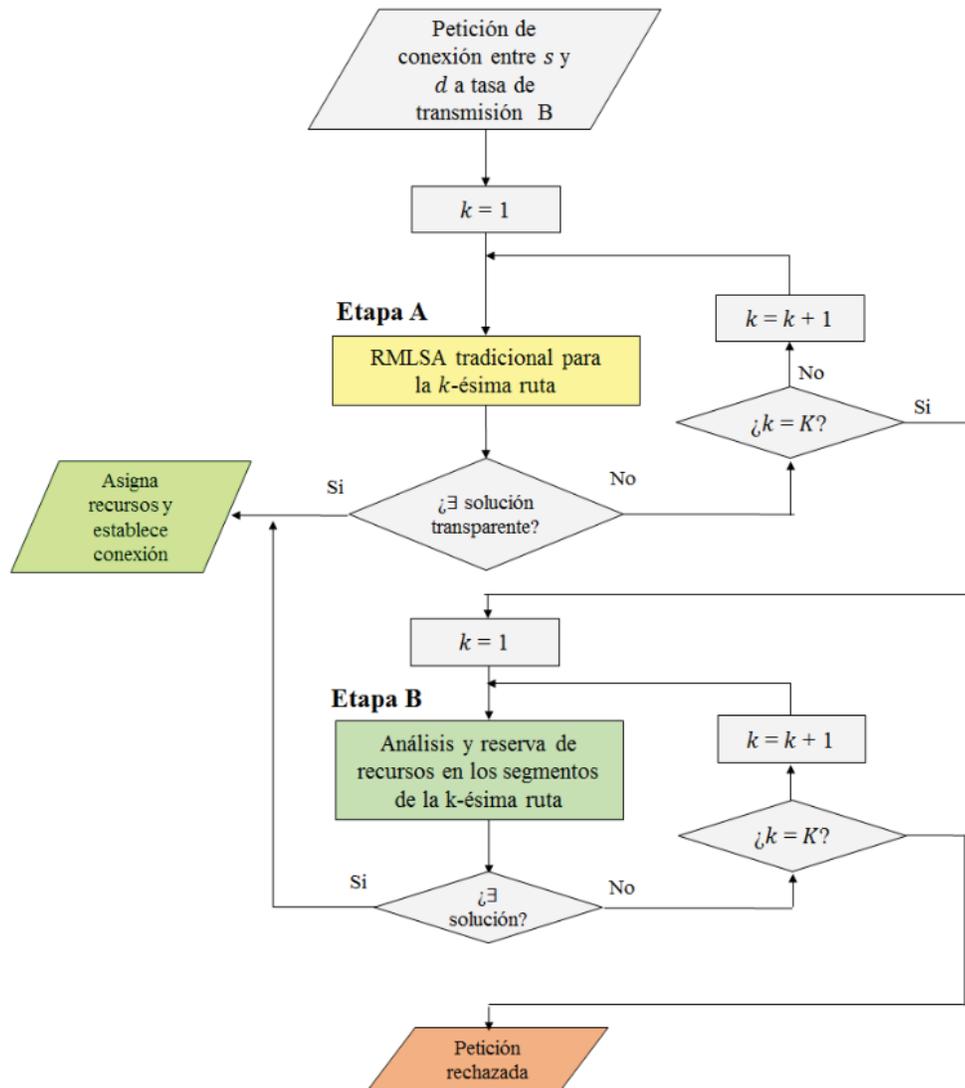


Figura 2-1: Esquema del algoritmo RMLSA propuesto.

En la Figura 2-2 se muestra el pseudo-código de la Etapa A. Para la ruta  $k$ -ésima,  $R_{s,d}^k$ , el algoritmo obtiene  $\mathcal{FM}(L_{s,d}^k, B_{s,d})$ . Si existen elementos en el conjunto, se escoge el formato de modulación que menor número de FSUs requiera (a través de  $\mathbb{FSU}[m, b]$ , tal que  $m \in \mathcal{FM}(L_{s,d}^k, B_{s,d})$  y  $b$  sea igual a  $B_{s,d}$ ). Con este número de FSUs, se ejecuta un algoritmo de asignación de espectro, buscando una porción de espectro contiguo y continuo (conexión transparente entre  $s$  y  $d$ ) que pueda contener a las FSUs requeridas a través de  $R_{s,d}^k$ . Si es posible encontrar una solución, se asignan los recursos para establecer la conexión. En caso contrario, intenta con la siguiente ruta más corta hasta que  $k = K$ . En El caso de no poder establecer una conexión transparente en alguna de las  $K$  rutas, se pasa a la Etapa B.

```

Etapa A: Algoritmo RMLSA aplicado a la ruta  $R_{s,d}^k$ .

- Obtener el conjunto  $\mathcal{FM}(L_{s,d}^k, B_{s,d})$ 
- if  $\mathcal{FM}(L_{s,d}^k, B_{s,d}) \neq \emptyset$  then
    ▪ Seleccionar el formato de modulación  $m \in \mathcal{FM}(L_{s,d}^k, B_{s,d})$  relacionado a  $\mathbb{FSU}[m, b]_{min}$ , el cual corresponde al menor valor en  $\mathbb{FSU}[m, b]$  tal que  $b = B_{s,d}$ .
    ▪ Obtener  $\mathbb{U}(R_{s,d}^k)$ .
    ▪ Obtener  $\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(R_{s,d}^k)]$ 
    ▪ Obtener  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(R_{s,d}^k)]\|_{max}$ 
    ▪ if  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(R_{s,d}^k)]\|_{max} \geq \mathbb{FSU}[m, b]_{min}$  then
        • Ejecutar algoritmo SA (asignación de espectro).
        • Reservar recursos // existe solución transparente.
    else
        • Salir de la etapa A
    else
        ▪ Salir de la etapa A.
    
```

Figura 2-2: Pseudo-código de etapa A en algoritmo propuesto, correspondiente a un algoritmo RMLSA tradicional.

## 2.2 Etapa B

Esta etapa se activa cuando no es posible establecer una conexión completamente óptica o transparente en ninguna de las  $K$  rutas pre-calculadas. En este caso, el algoritmo analiza nuevamente las rutas candidatas buscando utilizar **sólo un regenerador/conversor de formato de modulación** en algún nodo intermedio de la ruta  $R_{s,d}^k$ .

Para comprender la etapa B se definen los siguientes términos:

- $N(R_{s,d}^k)$  es el número de nodos que componen la ruta  $R_{s,d}^k$ .
- $C(N_i)$  es el número de conversores/regeneradores disponibles (desocupados) en el nodo  $i$ -ésimo.
- $\mathcal{S}(R_{s,d}^k) = \{S^1(R_{s,d}^k), \dots, S^i(R_{s,d}^k), \dots, S^{N(R_{s,d}^k)-2}(R_{s,d}^k)\}$  es el conjunto de segmentos que componen la ruta  $R_{s,d}^k$ , donde cada uno tiene como origen el nodo  $s$  (fuente de la solicitud de conexión) y el nodo final es el  $i$ -ésimo anterior al nodo  $d$ .

- $\mathcal{S}(R_{s,d}^k)^* = \{S^1(R_{s,d}^k)^*, \dots, S^i(R_{s,d}^k)^*, \dots, S^{N(R_{s,d}^k)-2}(R_{s,d}^k)^*\}$  es el conjunto de segmentos que componen la ruta  $R_{s,d}^k$ , donde cada uno tiene como origen el nodo  $i$ -ésimo anterior al nodo  $d$  y el nodo final es el  $d$  (destino de la solicitud de conexión).
- $L[S^i(R_{s,d}^k)]$  y  $L[S^i(R_{s,d}^k)^*]$  son los largos, en km, de los segmentos  $S^i(R_{s,d}^k)$  y  $S^i(R_{s,d}^k)^*$ , respectivamente.
- $\mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)], B_{s,d})$  y  $\mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)^*], B_{s,d})$  son los conjuntos de formatos de modulación pertenecientes a  $\mathcal{M}$  que, en conjunto con la tasa de transmisión  $B_{s,d} \in \beta$ , tienen un alcance óptico mayor o igual a  $L[S^i(R_{s,d}^k)]$  y  $L[S^i(R_{s,d}^k)^*]$ , respectivamente.
- $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))$  y  $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)$  son los vectores de disponibilidad de FSUs del segmento  $S^i(R_{s,d}^k)$  y  $S^i(R_{s,d}^k)^*$ , respectivamente.
- $\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))]$  y  $\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)]$  son los conjuntos de FSUs disponibles y contiguos en el espectro en el vector  $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))$  y  $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)$ , respectivamente.
- $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))]\|_{\max}$  y  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)]\|_{\max}$  son los números máximos de FSUs contiguos y disponibles en los vectores  $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))$  y  $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)$ , respectivamente.

En la Figura 2-3 se muestra el pseudo-código de la Etapa B. El algoritmo divide la ruta  $k$ -ésima en dos segmentos. En la primera iteración, el primer segmento es conformado desde el nodo origen hasta un nodo anterior al nodo final (por la misma ruta), y el segundo segmento es el correspondiente al tramo no cubierto por el segmento anterior. De esta forma, el algoritmo trata de establecer la conexión de manera independiente en ambos segmentos, es decir, suponiendo que en el nodo final del primer segmento (o inicial del segundo segmento) existe un conversor de formato de modulación disponible capaz de escoger el formato de modulación y la posición espectral de la conexión óptica independientemente de lo que se escoja en el otro segmento de la ruta. Si no es posible establecer la conexión en los dos segmentos de la ruta, se vuelve a iniciar esta etapa pero con otros dos segmentos de la ruta. Esto se repite hasta agotar las posibilidades de analizar 2 segmentos de la ruta. Si finalmente no es posible establecer la conexión con alguna combinación de dos segmentos en la ruta  $k$ -ésima  $R_{s,d}^k$ , el algoritmo reinicia la etapa B pero con la siguiente ruta candidata. Todo esto, hasta analizar la última ruta  $k = K$ . En caso de no encontrar solución en ninguna de las rutas candidatas, el algoritmo rechaza la petición de conexión.

## 2.3 Publicaciones

Como resultado de este trabajo se confeccionaron 2 artículos en los que se resumieron los resultados obtenidos de esta propuesta. El primero, centrado en las simulaciones hechas en la topología de red NSFNET, se presentó en la conferencia IEEE CHILECON 2017 [42], la cual se llevó a cabo en la ciudad de Pucón. El segundo se presentó en el concurso “Call of Papers” en el “Primer Congreso de Ingeniería Electrónica”, organizado por la Universidad de Concepción [43]. Este artículo obtuvo el segundo lugar en esta actividad (Consultar apéndice).

```

Etapa B: Algoritmo RMLSA en segmentos de ruta.

i = 1
If i ≤  $N(R_{s,d}^k) - 2$  then
  If  $C(N_i) \neq 0$  then
    - Obtener  $S^i(R_{s,d}^k)$ .
    - Obtener  $L[S^i(R_{s,d}^k)]$ 
    - Obtener  $\mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)], B_{s,d})$ 
    - if  $\mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)], B_{s,d}) \neq \emptyset$  then
      ▪ Seleccionar el formato de modulación  $m \in \mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)], B_{s,d})$  relacionado a  $\mathbb{FSU}[m, b]_{min}$ , el cual corresponde al menor valor en  $\mathbb{FSU}[m, b]$  tal que  $b = B_{s,d}$ .
      ▪ Obtener  $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))$ .
      ▪ Obtener  $\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))]$ 
      ▪ Obtener  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))]\|_{max}$ 
      ▪ If  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))]\|_{max} \geq \mathbb{FSU}[m, b]_{min}$  then
        • Ejecutar algoritmo SA en  $S^i(R_{s,d}^k)$  y reservar recursos.
        • Obtener  $S^i(R_{s,d}^k)^*$ : complemento de  $S^i(R_{s,d}^k)$ .
        • Obtener  $L[S^i(R_{s,d}^k)^*]$ 
        • Obtener  $\mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)^*], B_{s,d})$ 
        • If  $\mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)^*], B_{s,d}) \neq \emptyset$  then
          ~ Seleccionar el formato de modulación  $m \in \mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)^*], B_{s,d})$  relacionado a  $\mathbb{FSU}[m, b]_{min}$ .
          ~ Obtener  $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)$ .
          ~ Obtener  $\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)]$ 
          ~ Obtener  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)]\|_{max}$ 
          ~ If  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)]\|_{max} \geq \mathbb{FSU}[m, b]_{min}$  then
            * Ejecutar algoritmo SA en  $S^i(R_{s,d}^k)^*$  y reservar recursos.
            * Salir de la Etapa B.
          ~ else
            * Se liberan recursos reservados.
            * Iniciar nuevamente la Etapa B pero con  $i=i+1$ 
        • else
          ~ Se liberan los recursos reservados.
          ~ Iniciar nuevamente la Etapa B pero con  $i=i+1$ 
      ▪ else
        • Iniciar nuevamente la Etapa B, pero con  $i = i + 1$ .
    - Else
      ▪ Iniciar nuevamente la Etapa B pero con  $i=i+1$ 
  else
    ▪ Iniciar nuevamente la Etapa B pero con  $i=i+1$ 
Else
  - Salir de la Etapa B.
  
```

Figura 2-3 Pseudo-código de etapa B del algoritmo propuesto.

## 3 Parámetros, constantes y consideraciones para las simulaciones

En este capítulo, se definen los principales parámetros que caracterizan a cada uno de escenarios de simulación utilizados para evaluar y comparar el rendimiento del algoritmo RMLSA propuesto con respecto al algoritmo RMLSA tradicional.

### 3.1 Simulador

Para medir el rendimiento de cada algoritmo RMLSA se utiliza un simulador de eventos discretos asíncrono [44], programado en el 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.

A grandes rasgos, el simulador recibe como parámetros de entrada, la topología física de la red, la caracterización del tráfico de datos (carga de tráfico), capacidad de los enlaces (en términos de espectro o número de total de FSUs), el número de transpondedores flexibles de transmisión y recepción, y el número de conversores/regeneradores presentes en cada nodo.

Mientras se ejecuta el simulador, dos tipos de eventos pueden ocurrir. A continuación, se describe cada uno de ellos:

#### 3.1.1 Evento de petición de conexión.

En una red óptica elástica, el nodo fuente envía al PCE (*Path Computation Element*) una solicitud de conexión, indicando cual es el nodo destino y además la velocidad de transmisión digital a la cual desea enviar la información. Es en el PCE en donde se ejecuta el algoritmo RMLSA implementado en el plano de control de la red. En general, cada algoritmo RMLSA tiene como primera tarea, calcular y/o asignar una ruta para conectar los nodos fuente y destino a través de la red. Si el ruteo se realiza de manera off-line (ruteo fijo o fijo alternado), las rutas son obtenidas de una tabla que contiene a las rutas candidatas para conectar todos los pares de nodos de la red. Una vez obtenidas las rutas candidatas, éstas son proporcionadas al algoritmo encargado de asignar el formato de modulación. Este algoritmo determina el formato de modulación adecuado para cada ruta candidata en función de la distancia a cubrir, la velocidad de transmisión digital y

algún parámetro a optimizar (por ejemplo, uso de espectro, costo o consumo energético). La elección de este algoritmo se traduce en un requerimiento de espectro o número de FSUs. Adicionalmente se debe sumar una banda de guarda (por ejemplo, de un FSU), la que permite separar los canales y facilitar su posterior filtraje y recuperación en el nodo destino. Finalmente, el requerimiento total de espectro es proporcionado como parámetro de entrada a un algoritmo SA, el cual se encarga de realizar la búsqueda de espectro o FSUs en las rutas candidatas para establecer la conexión. Si el algoritmo SA logra encontrar la suficiente cantidad de espectro consecutivo en alguna ruta candidata, cumpliendo con todas las restricciones del problema RMLSA, se procede a reservar y asignar los recursos (transpondedores, FSUs y conmutadores ópticos) para establecer la conexión. En caso contrario, se evalúa establecer la petición de conexión mediante 2 segmentos, tal como se detalló en el capítulo 2. Si es posible establecer la conexión mediante segmentos, se procede a asignar los recursos (transpondedores, FSUs, conversor, etc).

Tras la ocurrencia de este tipo de evento, se deben actualizar los contadores estadísticos (por ejemplo, peticiones atendidas y bloqueadas, conversores utilizados, etc) que permiten cuantificar el rendimiento de los algoritmos evaluados.

### **3.1.2 Evento de desconexión**

En un evento de desconexión, se produce la liberación de todos los recursos (espectro y dispositivos), previamente utilizados, para comunicar un par de nodos en la red, luego de transcurrido el tiempo de conexión (dependiente de la carga de tráfico). Dependiendo si el evento de conexión fue establecido de forma transparente o mediante segmentos, la liberación de recursos varía.

Mediante la simulación de eventos se pueden obtener resultados numéricos acerca del rendimiento del algoritmo RMLSA propuesto. Para esto se simula un gran número de peticiones de conexión. Una vez que han sido procesadas todas las solicitudes la simulación concluye, entregando información de interés a partir del valor final de los contadores estadísticos (por ejemplo, probabilidad de bloqueo global, probabilidad de bloqueo por FSUs, probabilidad de bloqueo por alcance, etc).

## **3.2 Métricas de evaluación**

Para medir el rendimiento del algoritmo se utilizará como métrica de evaluación la probabilidad de bloqueo, que es la más utilizada cuando el modo de operación es dinámico. Además, se analizarán las contribuciones que tienen en ésta los bloqueos por alcance, FSUs y por falta de disponibilidad de conversores en un nodo intermedio.

### **3.2.1 Probabilidad de bloqueo ( $P_b$ )**

La probabilidad de bloqueo es la cuantificación de la posibilidad de que una petición de conexión no pueda ser atendida por falta de recursos ópticos disponibles en la red o porque no se satisface la restricción de alcance de las señales portadoras. Los recursos que, al no estar disponibles

pueden generar un bloqueo, pueden ser transpondedores de transmisión y recepción, espectro consecutivo disponibles (número determinado de FSUs en los enlaces que componen a las rutas candidatas) o bien la disponibilidad de conversores.

El rendimiento de un algoritmo RMLSA depende de la cantidad de rutas candidatas que éste considera, del algoritmo encargado de asignar el formato de modulación y de la estrategia utilizada para realizar el proceso de búsqueda y asignación de FSUs. Es posible concluir que un algoritmo tiene mejor desempeño que otro, cuando, bajo las mismas condiciones, bloquea una menor cantidad de peticiones de conexión.

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 una simulación. El número de peticiones generadas debe ser lo suficientemente grande como para que este valor pueda aproximarse a una probabilidad.

$$PB_{global} = \frac{N^{\circ} \text{ de Peticiones bloqueadas}}{N^{\circ} \text{ de Peticiones generadas}} \quad (3-1)$$

Esta probabilidad de bloqueo global se puede desglosar en las distintas contribuciones que la conforman, como lo son los bloqueos por transponder, bloqueos por alcance, bloqueos por FSUs y los bloqueos por conversores.

$$Contrib_{por \ transponder} = \frac{N^{\circ} \text{ de Bloqueos por transponder}}{N^{\circ} \text{ de Peticiones generadas}} \quad (3-2)$$

$$Contrib_{por \ alcance} = \frac{N^{\circ} \text{ de Bloqueos por alcance}}{Peticiones generadas} \quad (3-3)$$

$$Contrib_{por \ FSUs} = \frac{N^{\circ} \text{ de Bloqueos por FSUs}}{Peticiones generadas} \quad (3-4)$$

$$Contrib_{por \ conversores} = \frac{N^{\circ} \text{ de Bloqueos por conversores}}{Peticiones generadas} \quad (3-5)$$

### 3.3 Características de los escenarios de simulación

En esta sección, se exponen las consideraciones realizadas y los parámetros utilizados para cada uno de los escenarios de simulación.

#### 3.3.1 Velocidades de transmisión digital soportadas por la red

Las redes ópticas elásticas permitirán la coexistencia de canales ópticos con diferentes anchos de banda. El disponer de diversas velocidades de transmisión digital permite a la red adaptarse a los

diversos requerimientos de las fuentes de información (clientes), evitando la asignación excesiva de recursos.

En este trabajo, los nodos fuente pueden solicitar conectarse con el nodo destino a una de cinco posibles velocidades de transmisión digital. Las velocidades corresponden a 10, 40, 100, 400 y 1000 Gbps. Las primeras tres corresponden a velocidades estándares utilizadas por sistemas de transmisión comercializados e instalados en la actualidad. Las dos restantes corresponden a las velocidades propuestas para los sistemas de transmisión de siguiente generación.

### 3.3.2 Requerimientos de espectro para cada velocidad de transmisión

En este trabajo, se utiliza OFDM como esquema de modulación multiportadora para implementar las diferentes velocidades de transmisión soportadas por la red. Con este enfoque, cada canal óptico consiste de un conjunto de sub-portadoras moduladas a baja velocidad, las cuales son moduladas ortogonalmente. El espectro de cada sub-portadora puede traslaparse parcialmente, siempre y cuando se cumpla con las restricciones de ortogonalidad. Esta técnica se caracteriza por obtener una alta eficiencia espectral.

Con este enfoque, el alcance óptico depende del formato de modulación y de la velocidad de cada sub-portadora y no de la tasa de transmisión efectiva de cada canal, por lo tanto, es posible aumentar el alcance óptico transmitiendo a velocidades de 400 o incluso 1000 Gbps. Uno inconveniente de utilizar una gran cantidad de sub-portadoras de baja velocidad (para construir un súper canal) es que se requiere de una mayor cantidad de espectro. Sin embargo, se presenta como alternativa a utilizar regeneradores en toda la red, lo cual aumenta considerablemente los costos y el consumo energético.

Tabla 3-1 Formato de modulación, capacidad y alcance de sub-portadoras [45]

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

En la Tabla 3-1 se presentan los formatos de modulación utilizados para la evaluación del algoritmo propuesto. Cada formato se traduce en una capacidad de sub-portadora y un alcance máximo. Los alcances ópticos de cada formato de modulación han sido asumidos en función de las características de los transpondedores comercializados en los últimos años [9] y de alcances obtenidos en pruebas de laboratorio [10]. En este trabajo, se añade, como banda de guarda, un FSU al extremo derecho de cada canal óptico. La Tabla 3-2 contiene el requerimiento de espectro y alcance de los caminos espectrales, en función de la velocidad de transmisión digital y del formato de modulación de las sub portadoras OFDM.

Tabla 3-2 Requerimiento de espectro para cada velocidad de transmisión.

Bit Rate [Gbps]	Formato Modulación	Sub-portadoras FSUs	FSUs+GB	Espectro señales [GHz]	Espectro total [GHz]	Alcance [km]
10	BPSK	1	2	12,5	25	4000
40	16QAM	1	2	12,5	25	500
40	QPSK	2	3	25	37,5	2000
40	BPSK	4	5	50	62,5	4000
100	16QAM	2	3	25	37,5	500
100	8QAM	3	4	37,5	50	1000
100	QPSK	4	5	50	62,5	2000
100	BPSK	8	9	100	112,5	4000
400	64QAM	6	7	75	87,5	125
400	32QAM	7	8	87,5	100	250
400	16QAM	8	9	100	112,5	500
400	8QAM	11	12	137,5	150	1000
400	QPSK	16	17	200	212,5	2000
400	BPSK	32	33	400	412,5	4000
1000	64QAM	14	15	175	187,5	125
1000	32QAM	16	17	200	212,5	250
1000	16QAM	20	21	250	262,5	500
1000	8QAM	27	28	337,5	350	1000
1000	QPSK	40	41	500	512,5	2000
1000	BPSK	80	81	1000	1012,5	4000

### 3.4 Modelo de tráfico

El tráfico generado por los distintos pares de nodos de red es del tipo ON-OFF. En éste, existen dos periodos de tiempo denominados “ $T_{ON}$ ” y “ $T_{OFF}$ ”. Durante el periodo “ $T_{ON}$ ” el nodo fuente transmite a la máxima la velocidad digital permitida. Mientras que, en el periodo denominado “ $T_{OFF}$ ” 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 duración media del periodo “ $T_{ON}$ ” y “ $T_{OFF}$ ”, es denotada por “ $Mean On$ ” y “ $Mean Off$ ”, respectivamente. En la Figura 3-1 se ilustra la situación descrita anteriormente.

La carga de tráfico ofrecida por cada conexión a la red ( $\rho$ ), se define en la ecuación (3-6)

$$carga\ de\ trafico\ (\rho) = \frac{Mean\ on}{Mean\ on + Mean\ off} \quad (3-6)$$

En este trabajo, todas las peticiones de conexión tienen la misma probabilidad de ocurrir y ofrecen la misma carga de tráfico  $\rho$ . El valor elegido “ $Mean On$ ” es de 1 [s] y el valor de “ $Mean Off$ ” se ajusta para generar cargas de tráfico ( $\rho$ ) de 0,1 a 0,9.

Mientras mayor es el valor de  $\rho$ , menor es el tiempo durante el cual no se transmite información entre los pares de nodos de la red, lo que se traduce en que una menor cantidad de recursos se encuentra disponible para atender nuevas peticiones de conexión, es decir, la probabilidad de bloqueo aumenta (sólo si no existen suficientes recursos como para establecer, simultáneamente, todas las posibles conexiones de la red).

### 3.5 Topologías de red

En este trabajo, se utilizan 2 topologías de red, las cuales generalmente son utilizadas por diversos autores para realizar evaluaciones en redes ópticas DWDM [46]. Las topologías utilizadas son National Science Foundation Network (NSFNet) [47] y European Optical Network (EON) [48].

La Fig. 3-1 contiene a la topología física NSFNet, en donde se identifican las ciudades y el largo de los enlaces en kilómetros. Esta red se constituye por 14 nodos y 21 enlaces bidireccionales (o 42 enlaces unidireccionales) y un grado de conectividad igual a 3. El promedio del largo de los enlaces es de 1086 km. Al considerar las tres primeras rutas más cortas para conectar cada par de nodos, se desprende la siguiente información: la ruta más corta es de 250 km, la ruta más larga es de 9130 km y el promedio de las rutas es de 3000 km.

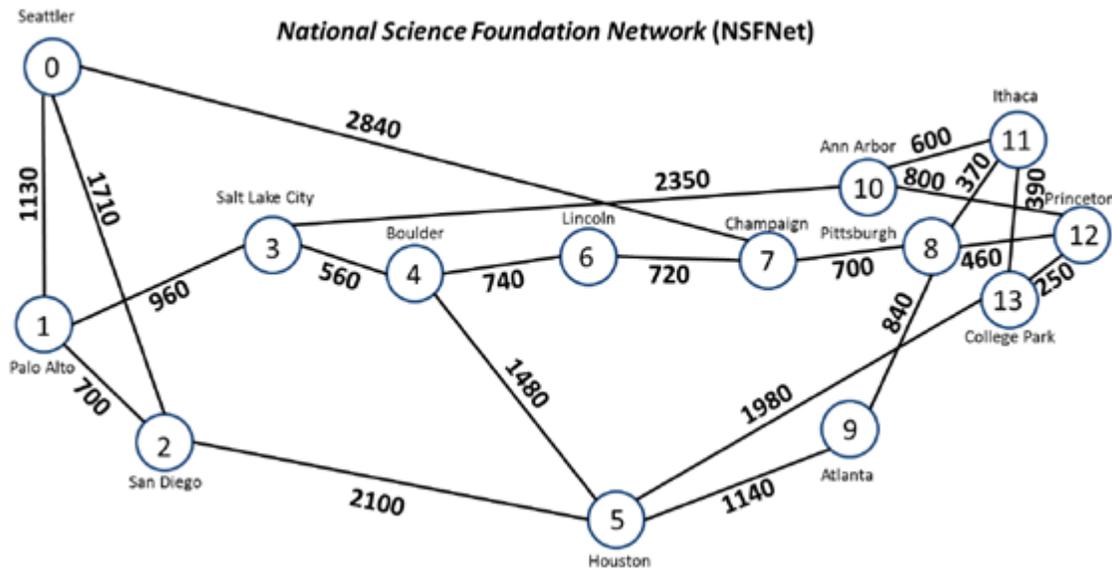


Figura 3-1 Topología de red NSFnet

La Fig. 3-2 contiene a la topología física EON, en donde se identifican las ciudades y el largo de los enlaces en kilómetros. Esta red se constituye por 20 nodos y 39 enlaces bidireccionales (o 78 enlaces unidireccionales) y un grado de conectividad igual a 4. El promedio del largo de los enlaces es de 623 km. Al considerar las tres primeras rutas más cortas para conectar cada par de nodos, se desprende la siguiente información: la ruta más corta es de 170 km, la ruta más larga es de 6120 km y el promedio de las rutas es de alrededor de 1700 km.

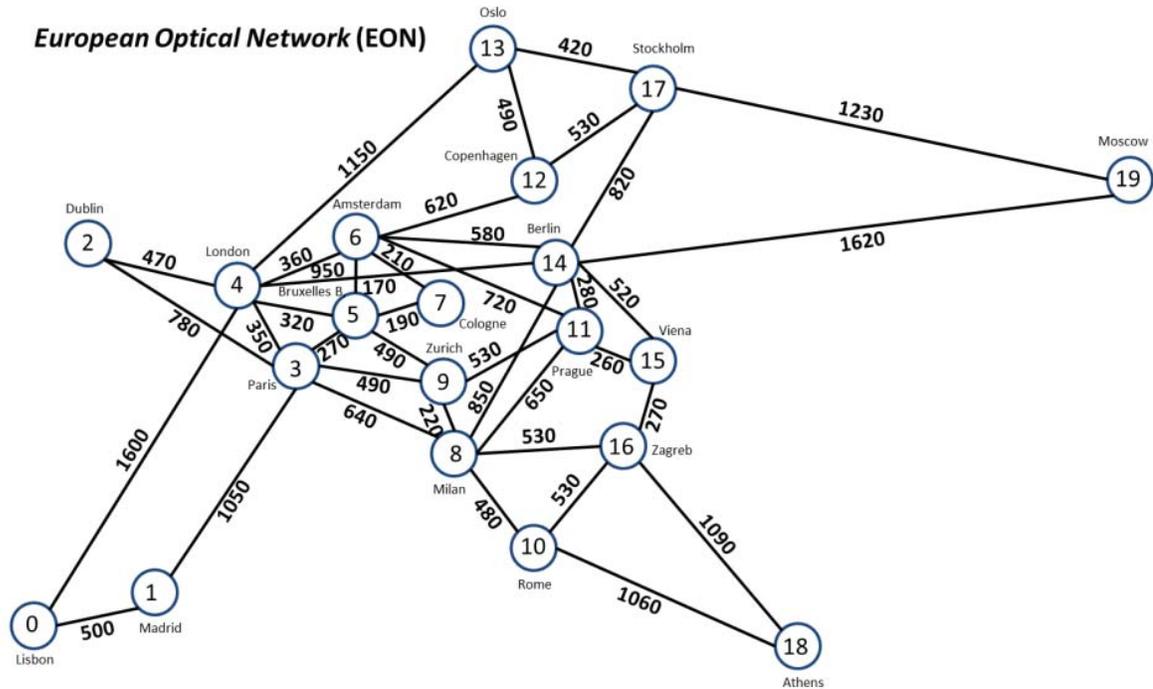


Figura 3-2 Topología red EON

### 3.6 Factor de red

Es un factor por el cual se multiplica el largo de los enlaces de las redes mencionadas, permitiendo reducir o extender dichos largos. La finalidad de este factor es permitir tener control sobre los bloqueos que se producen por alcance óptico. El factor de red ( $\alpha$ ) debe ser mayor a 0.

En este trabajo se utilizarán dos factores de red iguales a 0,5 y 1.

### 3.7 Distribución de probabilidad para los diferentes bit rates

Una de las características de los escenarios es la distribución de la probabilidad de ocurrencia para las distintas velocidades de transmisión soportadas por la red.

En este trabajo se utilizará una distribución del tipo uniforme, es decir, que las cinco velocidades de transmisión soportadas tienen la misma probabilidad de ocurrencia (0.2).

### 3.8 Características de los nodos

Para las simulaciones se asume que los nodos cuentan con transpondedores flexibles, los cuales pueden atender a una conexión a la vez. También se asume que puede existir sólo un *Spectrum Path* (una conexión) a la vez entre cada par de nodos. Debido a que el objetivo es evaluar el rendimiento de los algoritmos RMLSA, en función de la asignación de espectro (FSUs) y no es de interés estudiar el bloqueo por falta de dispositivos, es que cada nodo cuenta con  $N-1$  transpondedores de transmisión y recepción (en donde  $N$  es el número de nodos de la red). Bajo estas condiciones, no pueden producirse bloqueos por falta de dispositivos puesto que la

cantidad es suficiente para establecer una conexión entre todos los pares de nodos de la red de manera simultánea. Lo mismo ocurre con los dispositivos de conmutación flexibles, se asume que existe la suficiente cantidad como para conmutar la totalidad de las posibles conexiones de la red.

Además, cada nodo posee un número determinado de conversores/regeneradores, los cuales varían dependiendo del escenario a evaluar.

Como se mencionó en la sección 1.4, los nodos flexibles deben cumplir con las características de *colorless*, *directionless* y *contentionless*. En la figura 3-3 se presenta el diagrama de un nodo propuesto con estas características, que además posee una etapa de conversión/regeneración.

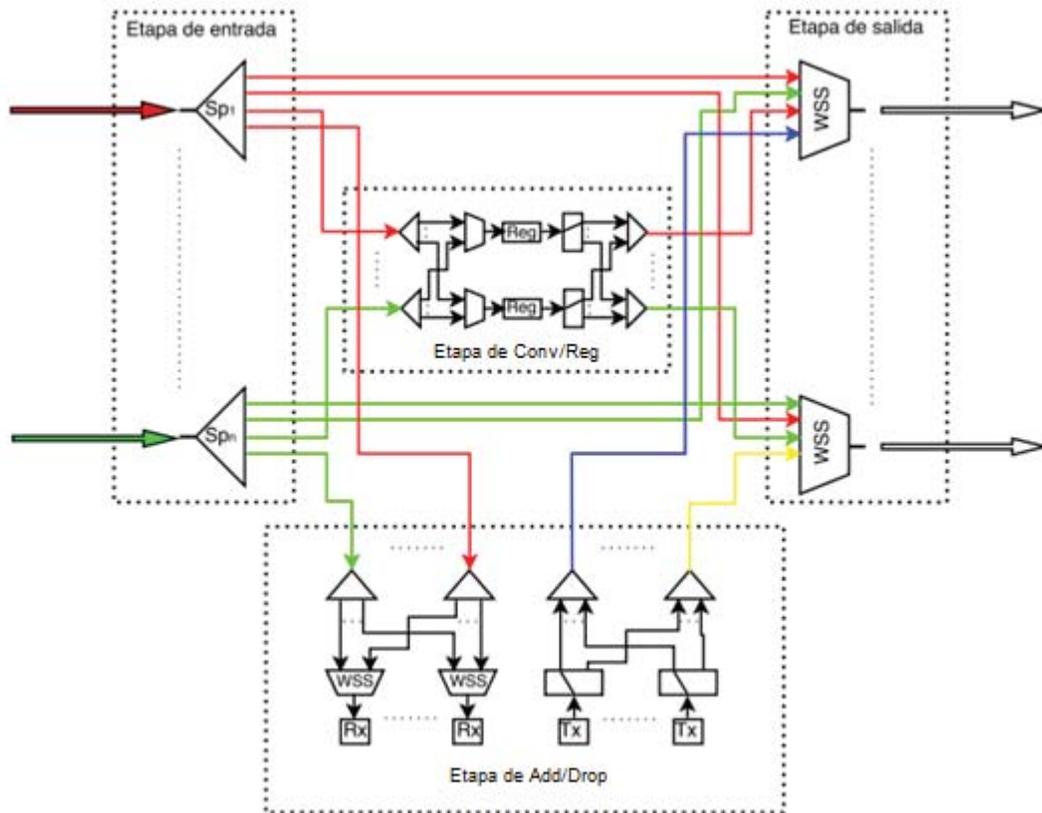


Figura 3-3 Nodo propuesto, con características C-D-C

### 3.9 FSUs disponibles en cada enlace

Cada FSU posee un ancho de banda de 12.5 GHz. Este ancho de banda ha sido estandarizado en la última versión de la recomendación G.694.1 de ITU -T, en la sección de asignación flexible de espectro (*flexigrid*).

Para evaluar el rendimiento del algoritmo propuesto se consideraron 3 valores diferentes de disponibilidad de FSUs por enlace, en ambas redes los cuales fueron 320, 240 y 160 FSUs con un total de ancho espectral de 4000, 3000 y 2000 GHz respectivamente.

### **3.10 Escenarios de simulación**

Luego de haber definido los parámetros de entrada al simulador, además de las variables consideradas en el algoritmo RMLSA propuesto, se presentan los diferentes escenarios a simular, cuyo objetivo es analizar y comparar el rendimiento del algoritmo propuesto (con regeneración y conversión de formato de modulación intermedia) respecto al algoritmo RMLSA tradicional.

La cantidad de escenarios simulados en este trabajo han sido 12, en todos ellos se utilizó el modelo de tráfico ON-OFF. 6 escenarios fueron simulados en la red NSFnet con un factor de red de 0,5 y 1, los otros 6 fueron simulados en la red EON con un factor de red igual a 0,5 y 1.

## 4 Resultados y análisis de la simulación

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante simulación, los que se ilustran a través de graficas comparativas para cada uno de los escenarios.

### 4.1 Escenarios en la red NSFnet

Como se mencionó anteriormente en este trabajo se utilizaron 2 topologías de red reales, ampliamente usadas en la literatura especializada para realizar evaluaciones en redes ópticas DWDM [14]. En esta sección se presentan todos los resultados de las pruebas realizadas en la topología de red NSFnet.

#### 4.1.1 Definición de escenarios

Se evaluaron 6 escenarios distintos con 2 factores de red ( $\alpha=0.5$  y  $\alpha=1$ ), y 3 valores distintos de disponibilidad de FSUs en los enlaces (160, 240 y 360).

Las características de cada escenario se resumen en la tabla 4-1.

Tabla 4-1 Características de escenarios red NSFnet

Id. Escenario	Factor de red ( $\alpha$ )	Total de FSUs	Espectro de cada fibra [GHz]	Transpondedores Tx/Rx por nodo	Convertidores disponibles por nodo	Distribución de <i>bit rate</i>
1	0,5	160	2000	13	1, 2, 4, 6	Uniforme
2	0,5	240	3000	13	1, 2, 4, 6	Uniforme
3	0,5	320	4000	13	1, 2, 4, 6	Uniforme
4	1	160	2000	13	1, 3, 9, 12	Uniforme
5	1	240	3000	13	1, 3, 9, 12	Uniforme
6	1	320	4000	13	1, 3, 9, 12	Uniforme

#### 4.1.2 Resultados de probabilidad de bloqueo general o global

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los distintos escenarios. Graficando el rendimiento en términos de probabilidad de bloqueo.

Como se observa en la figura 4-1 para redes de menor dimensión y con una baja cantidad de FSUs disponibles, la inclusión de regeneradores/conversores intermedios, no afecta significativamente en el rendimiento del algoritmo.

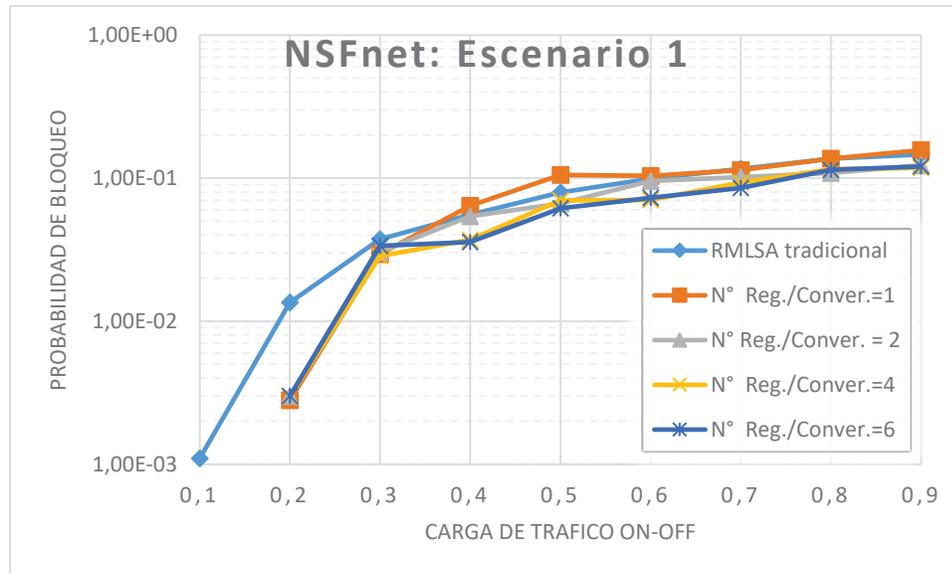


Figura 4-1 Probabilidad de bloqueo de un algoritmo RMLSA tradicional y del algoritmo RMLSA propuesto para el escenario 1

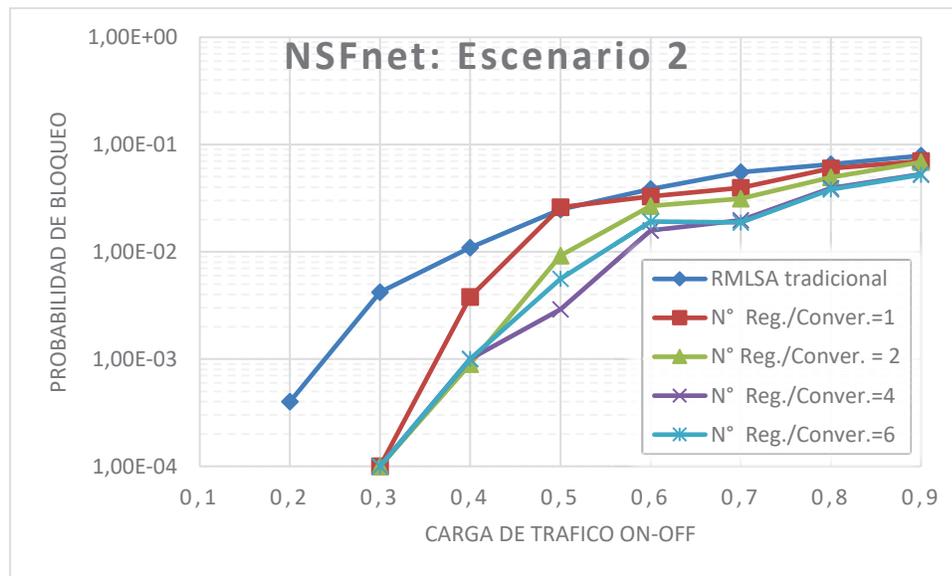


Figura 4-2 Probabilidad de bloqueo de un algoritmo RMLSA tradicional y del algoritmo RMLSA propuesto para el escenario 2

En la figura 4-2 se observa que al aumentar la cantidad de FSUs disponibles a 260, el algoritmo propuesto tiene un mejor desempeño que el algoritmo RMLSA tradicional hasta cargas de tráfico iguales a 0,5 y con 2 o más conversores. Para cargas mayores el algoritmo propuesto posee un mejor desempeño que el algoritmo RMLSA tradicional, pero con una diferencia de menos de un orden de magnitud.

En la figura 4-3 teniendo todo el espectro de la banda C disponible (320 FSUs) se observa que el algoritmo propuesto reduce la probabilidad de bloqueo hasta en un orden de magnitud, para cargas de tráfico menores o iguales a 0.8 con 4 o más conversores.

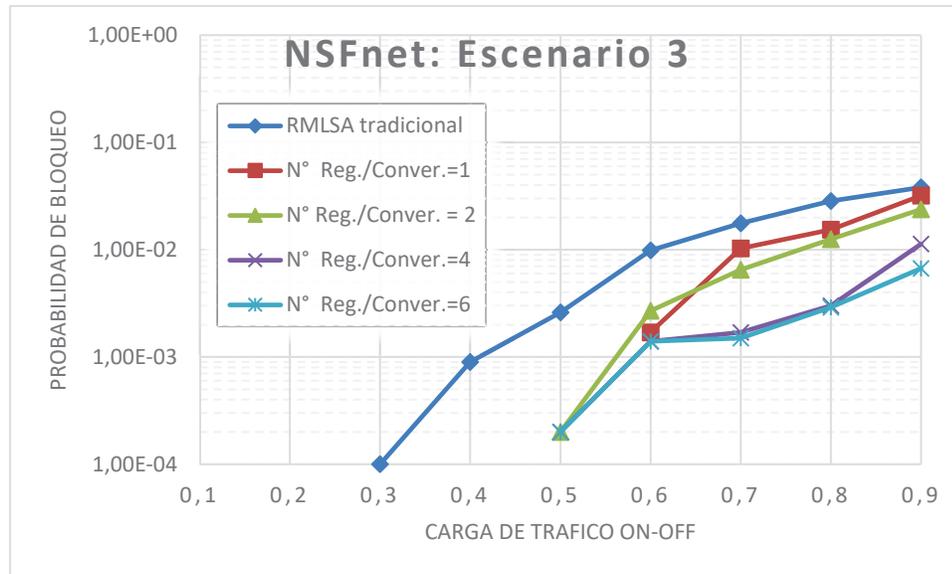


Figura 4-3 Probabilidad de bloqueo de un algoritmo RMLSA tradicional y del algoritmo RMLSA propuesto para el escenario 3

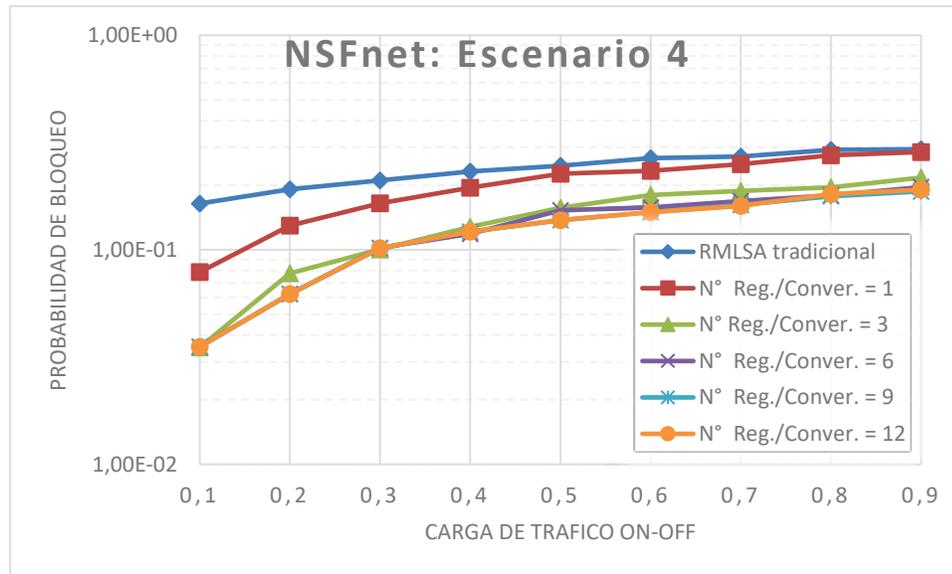


Figura 4-4 Probabilidad de bloqueo de un algoritmo RMLSA tradicional y del algoritmo RMLSA propuesto para el escenario 4

En la figura 4-4 se observa que el agregar regeneradores/conversores a la red y ocupando el algoritmo propuesto se obtiene un mejor rendimiento respecto del algoritmo RMLSA tradicional, no superando el orden de magnitud. También se observa que la inclusión de más de 3 conversores no afecta significativamente en el rendimiento del algoritmo propuesto.

Como se observa en la figura 4-5 para cargas de tráfico inferiores a 0.4 el algoritmo propuesto mejora el rendimiento respecto del algoritmo RMLSA tradicional en más de un orden de magnitud, para cargas superiores el algoritmo propuesto sigue siendo mejor. También se observa que el agregar más de 6 conversores no afecta significativamente en el rendimiento del algoritmo propuesto.

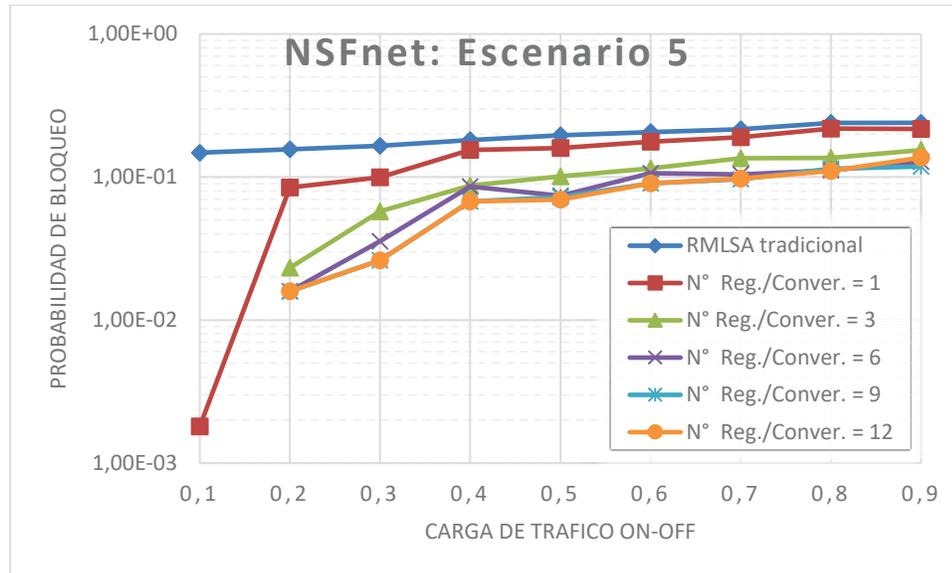


Figura 4-5 Probabilidad de bloqueo de un algoritmo RMLSA tradicional y del algoritmo RMLSA propuesto para el escenario 5

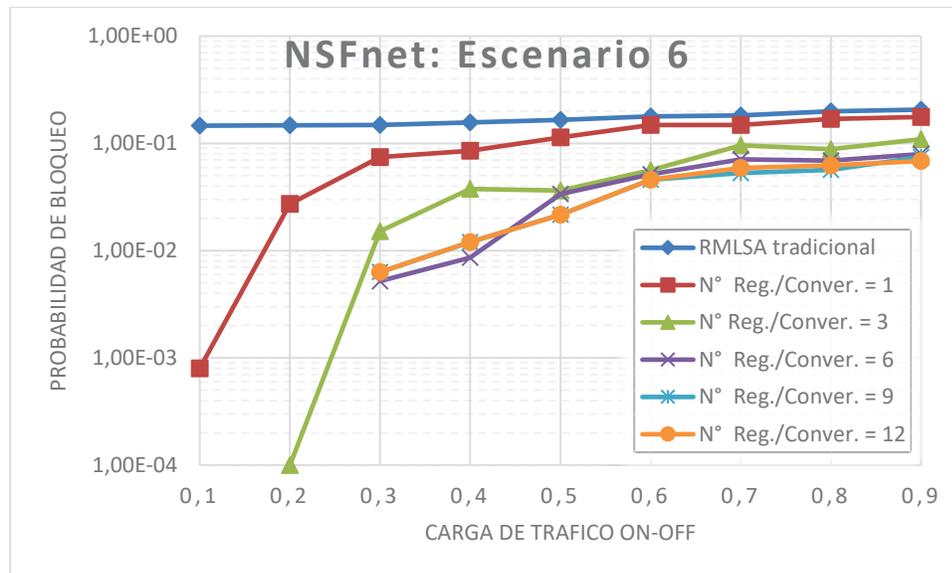


Figura 4-6 Probabilidad de bloqueo de un algoritmo RMLSA tradicional y del algoritmo RMLSA propuesto para el escenario 6

En la figura 4-6 se puede observar que para cargas menores a 0.5 el algoritmo propuesto mejora es más de un orden de magnitud la probabilidad de bloqueo con respecto al algoritmo RMLSA tradicional. Par cargas de tráfico mayores el algoritmo propuesto sigue siendo mejor. Por otro

lado, se observa que el agregar más de 9 conversores no afecta de forma significativa el rendimiento del algoritmo propuesto.

#### 4.1.3 Análisis de contribuciones

Como se explicó en el capítulo 3.2.1 la probabilidad de bloqueo global se puede desglosar en las distintas contribuciones que la conforman. A continuación, se definen cada una de ellas:

**Contribución por Transponders:** para que la probabilidad de bloqueo por falta de dispositivos no sea relevante en los resultados a obtener, mediante el modelo de tráfico On-Off, entonces se debe considerar que cada nodo cuente con  $N - 1$  transpondedores de transmisión (Tx) y recepción (Rx), respectivamente, donde  $N$  es la cantidad de nodos existentes en la red.

**Contribución por Alcance:** Ocurre cuando el alcance óptico de la señal es menor al largo de la ruta candidata para establecer la conexión. Es decir, si no se logra establecer una conexión transparente en ninguna de las rutas candidatas, o el largo de los segmentos de las rutas es mayor al alcance óptico de la señal, se produce un bloqueo por alcance.

**Contribución por FSUs:** bloqueo producto de la falta de FSUs continuas y contiguas en una ruta transparente completa o bien en uno de sus segmentos, dependiendo del tipo de conexión que se pueda establecer.

**Contribución por Conversores:** bloqueo producto de la falta de disponibilidad de un conversor/regenerador en un nodo intermedio en una ruta en la que se desee establecer una conexión mediante segmentos.

A continuación, se presenta un análisis del porcentaje de contribución de cada causa en la probabilidad de bloqueo global, dependiendo del número de Regeneradores/conversores disponibles en cada nodo para el escenario 6 (Tabla 4-1). Esto, debido a que fue el algoritmo propuesto que obtuvo un mejor desempeño.

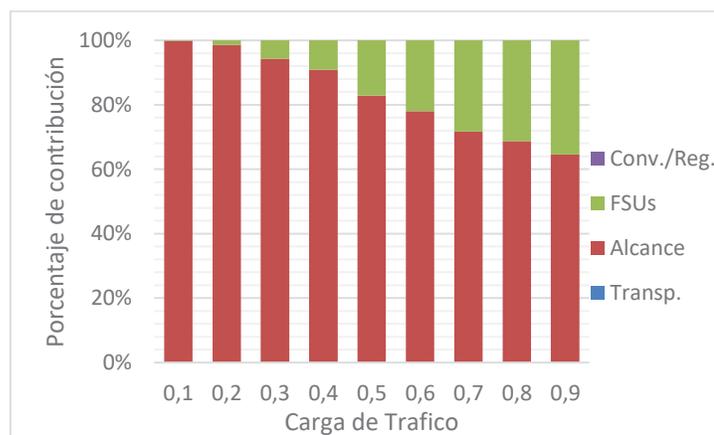


Figura 4-7 Contribución Probabilidad de Bloqueo RMLSA Tradicional

En el gráfico mostrado en la figura 4-7 muestra las contribuciones en la probabilidad de bloqueo para un algoritmo RMLSA tradicional (sin conversión de formato de modulación intermedio) se

observa que la mayor cantidad de bloqueos son por alcance y al ir aumentando la carga de tráfico ocurren bloqueos por FSUs. El incluir un convertor en cada nodo, disminuye drásticamente los bloqueos por alcance, dando paso a bloqueos por convertidores. Los que van aumentando a medida que aumenta la carga de tráfico (figura 4-8).

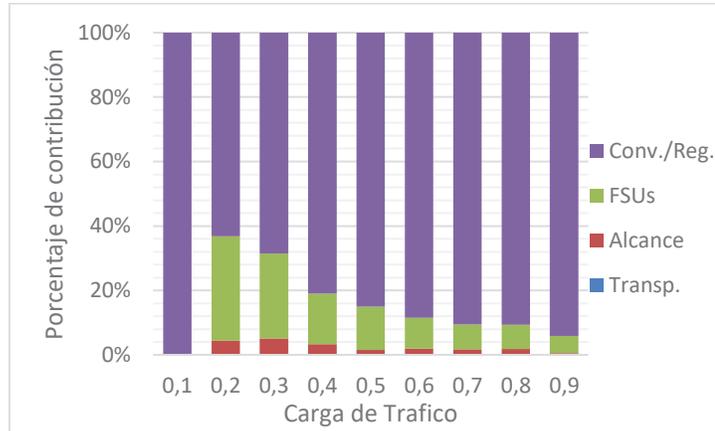


Figura 4-8 Contribución Probabilidad de Bloqueo con 1 Convertor por nodo

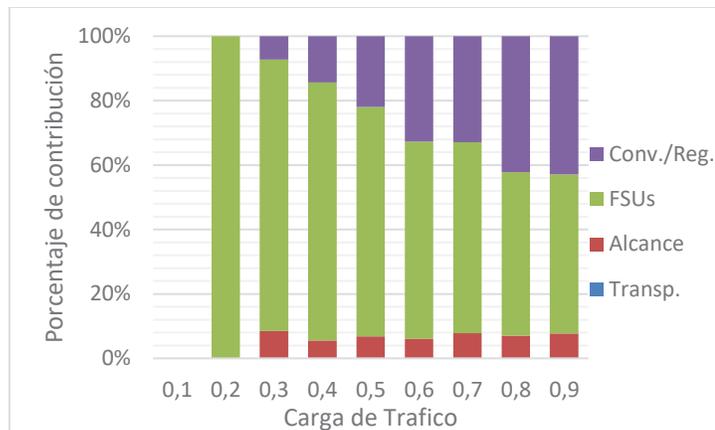


Figura 4-9 Contribución Probabilidad de Bloqueo con 3 Convertor por nodo

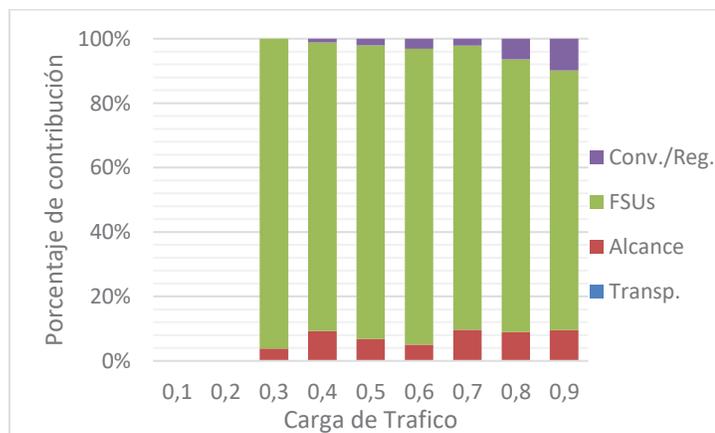


Figura 4-10 Contribución Probabilidad de Bloqueo con 6 Convertor por nodo

Al aumentar el número de convertidores a 3 (figura 4-9) se puede observar que los bloqueos por alcance son menores al 4% para todas las cargas de tráfico mayores o iguales a 0,3.

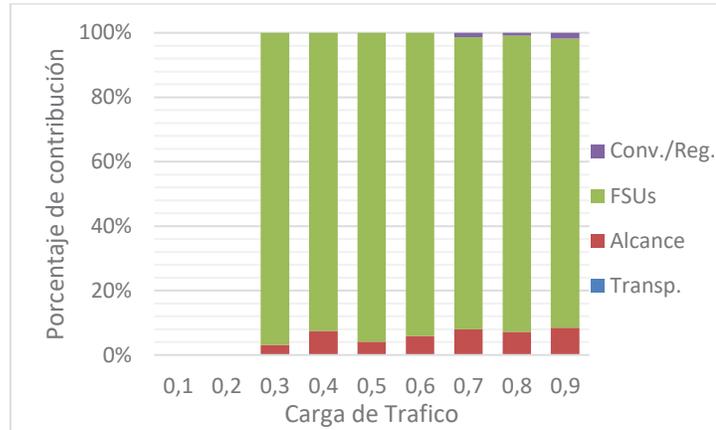


Figura 4-11 Contribución Probabilidad de Bloqueo con 9 Convertidor por nodo

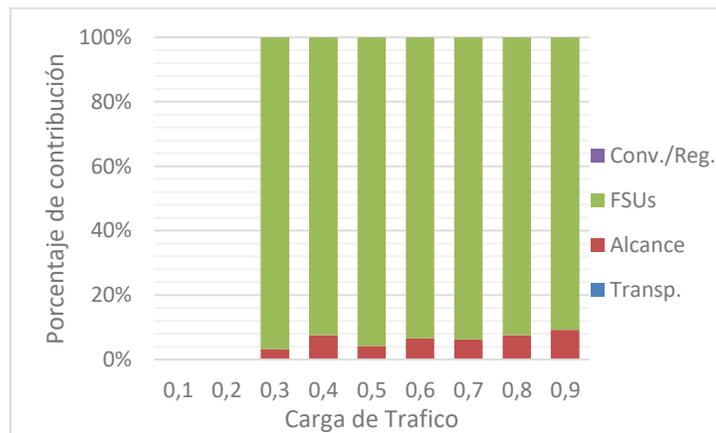


Figura 4-12 Contribución Probabilidad de Bloqueo con 12 Convertidor por nodo

El ir aumentando el número de convertidores (figuras 4-10, 4-11), implica una disminución de los bloqueos producto de la falta de estos, llegando a ser 0 con 12 convertidores por nodo (figura 4-12). Los bloqueos por FSUs en este caso corresponderían a sobre el 90%.

## 4.2 Escenarios en la red EON

En esta sección se presentan todos los resultados de las pruebas realizadas en la topología de red EON.

### 4.2.1 Definición de escenarios

Se evaluaron 6 escenarios distintos con 2 factores de red ( $\alpha=0.5$  y  $\alpha=1$ ), y 3 valores distintos de disponibilidad de FSUs en los enlaces (160, 240 y 360).

Las características de cada escenario se resumen en la tabla 4-2.

Tabla 4-2 Características de escenarios red EON

Id. Escenario	Factor de red ( $\alpha$ )	Total de FSUs	Espectro de cada fibra [GHz]	Transpondedores Tx/Rx por nodo	Convertidores disponibles por nodo	Distribución de <i>bit rate</i>
7	0,5	160	2000	19	1, 2, 4, 6	Uniforme
8	0,5	240	3000	19	1, 2, 4, 6	Uniforme
9	0,5	320	4000	19	1, 2, 4, 6	Uniforme
10	1	160	2000	19	1, 3, 9, 12	Uniforme
11	1	240	3000	19	1, 3, 9, 12	Uniforme
12	1	320	4000	19	1, 3, 9, 12	Uniforme

#### 4.2.2 Resultados de probabilidad de bloqueo general o global

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los distintos escenarios. Graficando el rendimiento en términos de probabilidad de bloqueo.

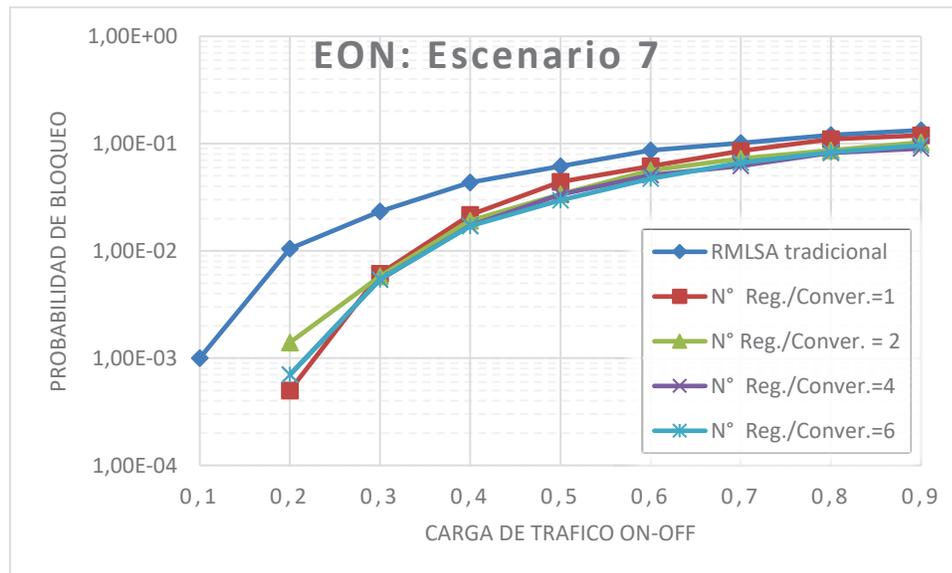


Figura 4-13 Probabilidad de bloqueo de un algoritmo RMLSA tradicional y del algoritmo RMLSA propuesto para el escenario 7

En la figura 4-7 se observa que utilizando el algoritmo propuesto la probabilidad de bloqueo disminuye más de un orden de magnitud para cargas de tráfico menores a 0,3, para carga mayores el algoritmo propuesto sigue teniendo un mejor desempeño que el algoritmo RMLSA tradicional, además se observa que esta mejora de rendimiento se obtiene agregando sol 1 convertidor, agregar mas no afecta de forma significativa el rendimiento del algoritmo.

En la figura 4-8 se observa que para cargas de tráfico menores a 0,6 el algoritmo propuesto presenta una mejora de rendimiento mayor a un orden de magnitud, para cargas superiores el algoritmo sigue siendo mejor que el algoritmo RMLSA tradicional, se observa además que agregar más de 2 convertidores no afecta el rendimiento de forma significativa.

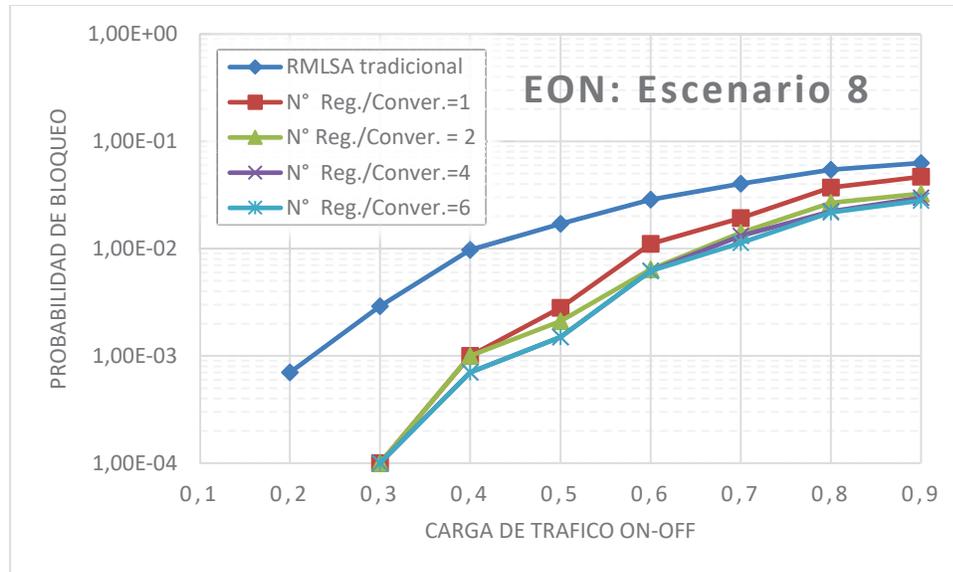


Figura 4-14 Probabilidad de bloqueo de un algoritmo RMLSA tradicional y del algoritmo RMLSA propuesto para el escenario 8.

En la figura 4-9 se observa que al aumentar el número de FSUs disponibles a 320 es cuando el algoritmo se comporta de mejor manera, obteniendo mejoras de rendimiento mayores a un orden de magnitud para cargas de tráfico de hasta 0.8, para cargas superiores el algoritmo propuesto sigue teniendo un mejor desempeño que el algoritmo RMLSA tradicional. También se puede observar que el agregar más de 4 conversores no afecta de forma significativa el rendimiento del algoritmo.

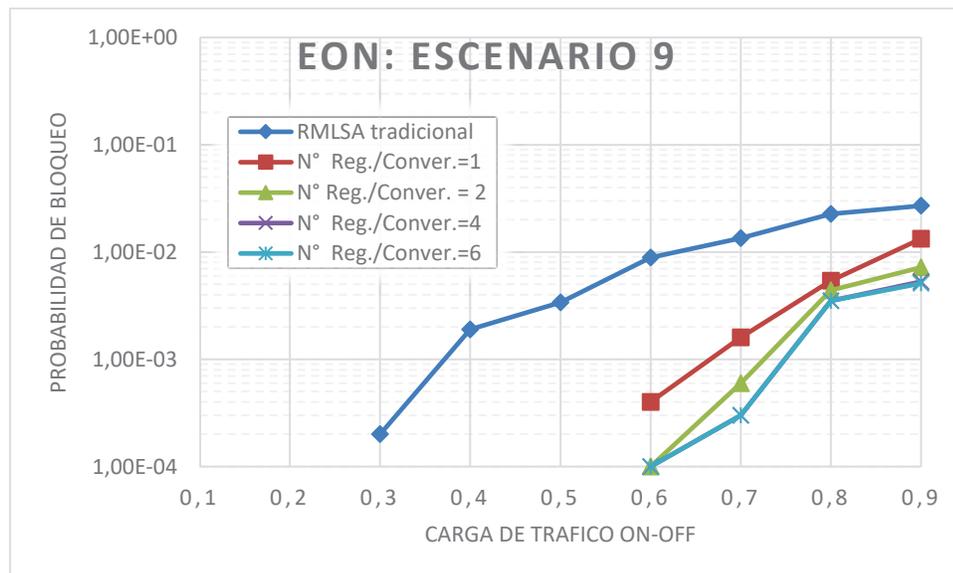


Figura 4-15 Probabilidad de bloqueo de un algoritmo RMLSA tradicional y del algoritmo RMLSA propuesto para el escenario 9

En la figura 4-10 se observa que, a pesar de que el algoritmo propuesto tiene un mejor rendimiento que el algoritmo RMLSA tradicional, esta mejora, es poco significativa para cargas

de tráfico superiores a 0,4. También se puede observar que el agregar más de 3 conversores no afecta de forma significativa el rendimiento del algoritmo.

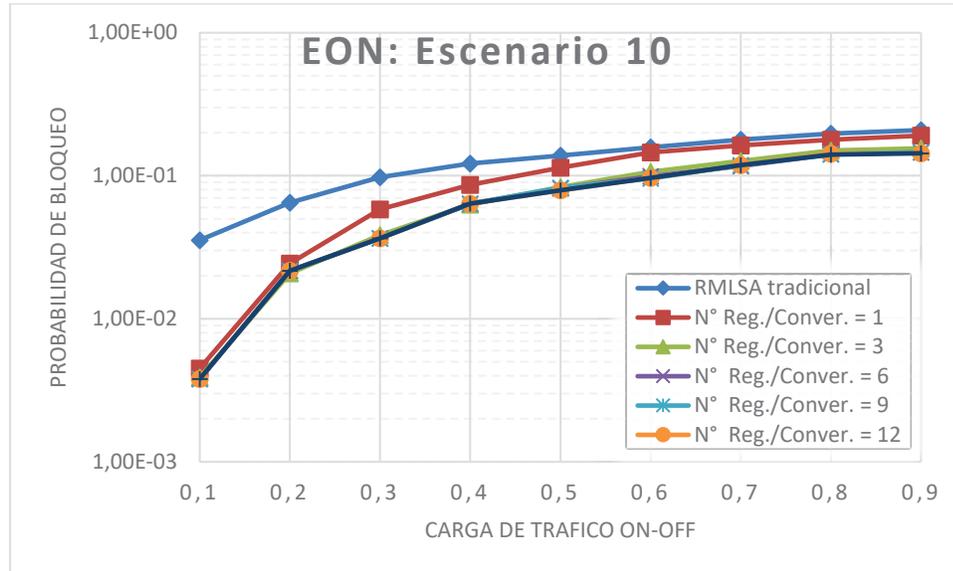


Figura 4-16 Probabilidad de bloqueo de un algoritmo RMLSA tradicional y del algoritmo RMLSA propuesto para el escenario 10

Como se observa en la figura 4-11 para cargas de tráfico inferiores a 0,4 el algoritmo propuesto mejora el rendimiento con respecto al algoritmo RMLS tradicional en más de un orden de magnitud, para cargas superiores el algoritmo propuesto sigue teniendo un mejor comportamiento. También se observa que incluir más de 3 conversores no afecta significativamente en el rendimiento del algoritmo.

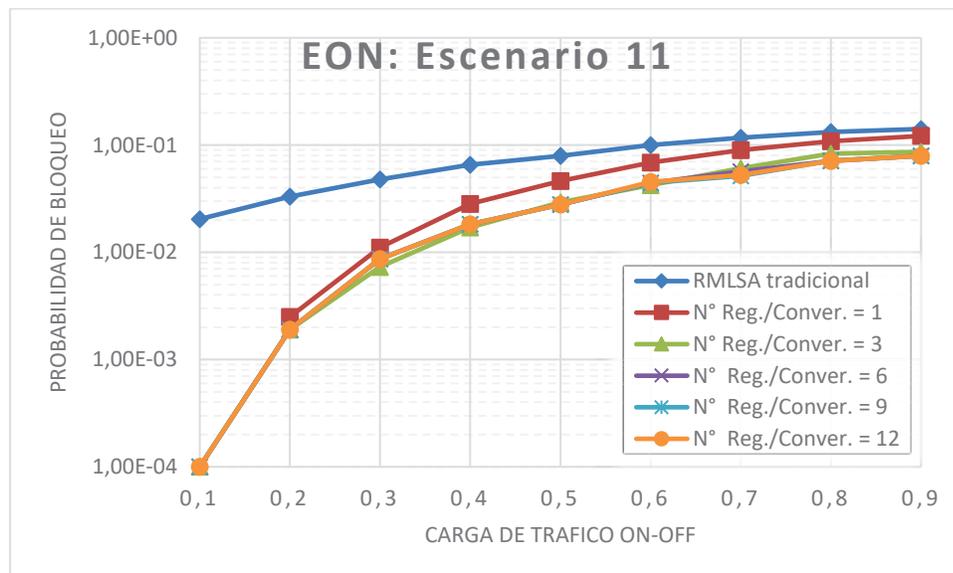


Figura 4-17 Probabilidad de bloqueo de un algoritmo RMLSA tradicional y del algoritmo RMLSA propuesto para el escenario 11

Se observa en la figura 4-12 que al tener disponible todo el espectro de la banda C (320 FSUs) el algoritmo mejora el rendimiento en más de un orden de magnitud para cargas de tráfico menores a 0.6, para cargas mayores el algoritmo propuesto sigue teniendo mejor rendimiento que el algoritmo RMLSA tradicional. También se puede observar que el incluir más de 3 conversores no afecta de manera significativa en el rendimiento del algoritmo propuesto.

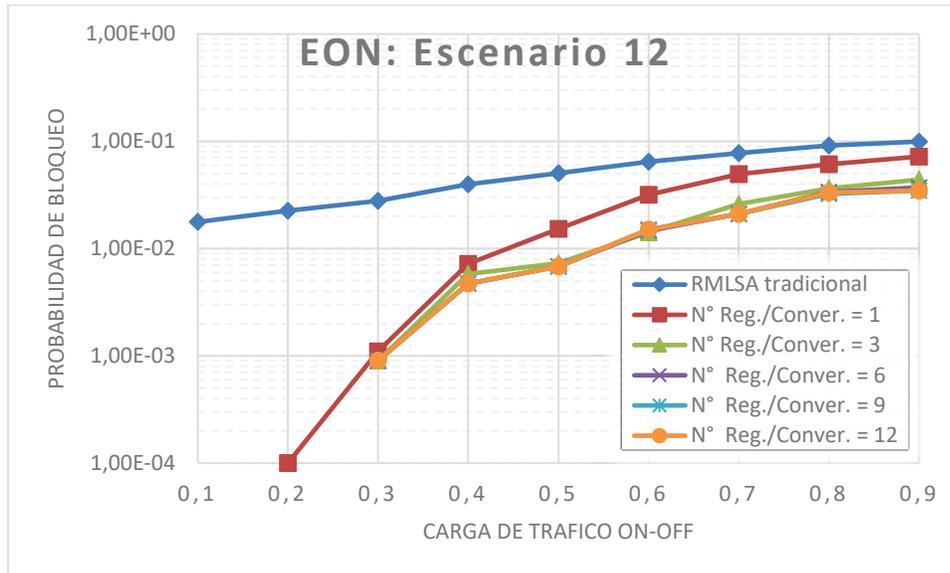


Figura 4-18 Probabilidad de bloqueo de un algoritmo RMLSA tradicional y del algoritmo RMLSA propuesto para el escenario 12.

### 4.2.3 Análisis de contribuciones

A continuación, se presenta un análisis del porcentaje de contribución de cada causa en la probabilidad de bloqueo global (por Transponder, por Alcance, por FSUs, por Conversores), dependiendo del número de Regeneradores/conversores disponibles en cada nodo para el escenario 12 (tabla 4-2), ya que este fue donde el algoritmo propuesto obtuvo un mejor desempeño.

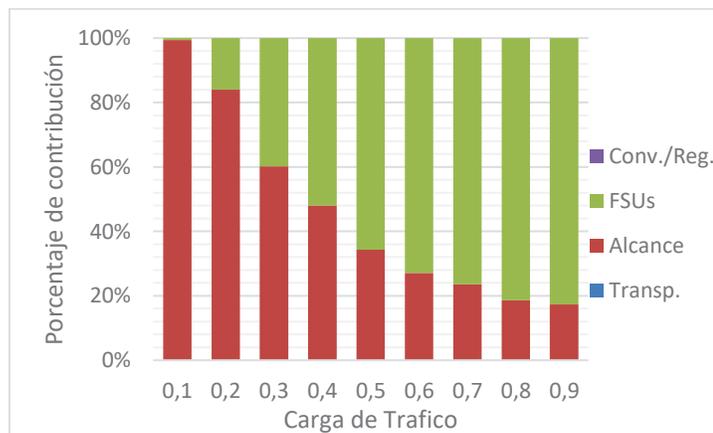


Figura 4-19 Contribución Probabilidad de Bloqueo RMLSA Tradicional

En la figura 4-19 se grafica el porcentaje de contribución en la probabilidad de bloqueo global para un algoritmo RMLSA tradicional. Se observa en la figura 4-20 que al incluir 1 conversor por nodo, los bloqueos por alcance prácticamente se anulan, dando paso a bloqueos por conversores, los que aumentan a medida que la carga de tráfico aumenta.

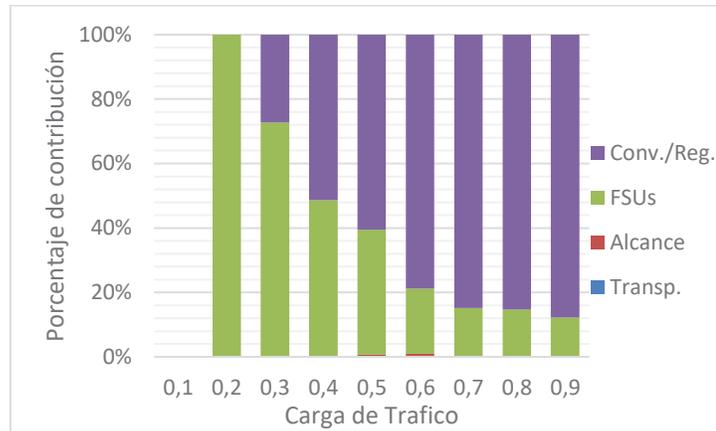


Figura 4-20 Contribución Probabilidad de Bloqueo con 1 Conversor por nodo

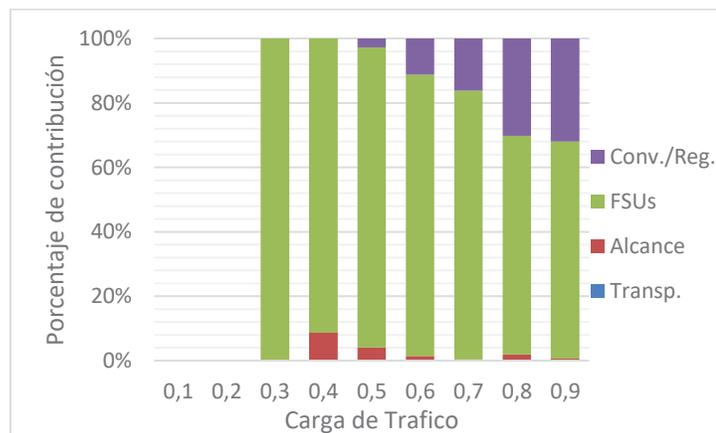


Figura 4-21 Contribución Probabilidad de Bloqueo con 3 Conversores por nodo

En la figura 4-21 se observa como al aumentar el número de conversores a 3 hace disminuir considerablemente los bloqueos por falta de conversores disponibles. Pasando a ser mayoritariamente bloqueos por FSUs.

Se observa que con 6 conversores o más (figuras 4-22, 4-23, 4-24) los bloqueos son principalmente por falta de FSUs disponibles en los enlaces. Al ir agregando más conversores, los bloqueos producidos por la falta de estos van disminuyendo hasta hacerse cero (Figura 4-23).

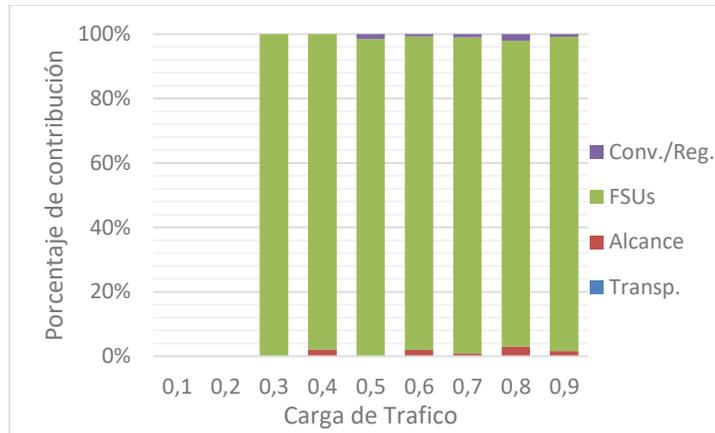


Figura 4-22 Contribución Probabilidad de Bloqueo con 6 Converters por nodo

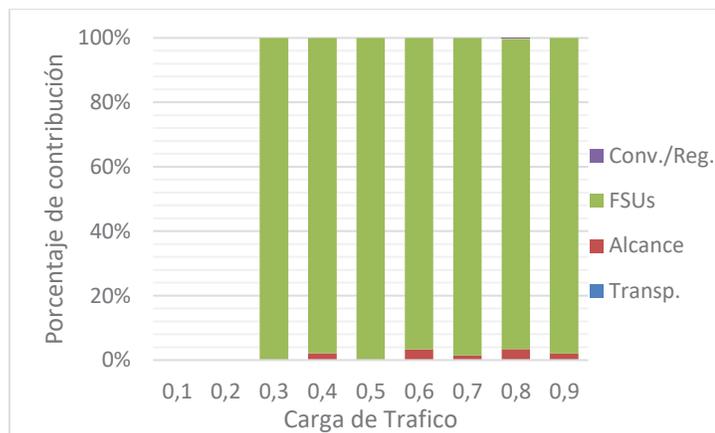


Figura 4-23 Contribución Probabilidad de Bloqueo con 9 Converters por nodo

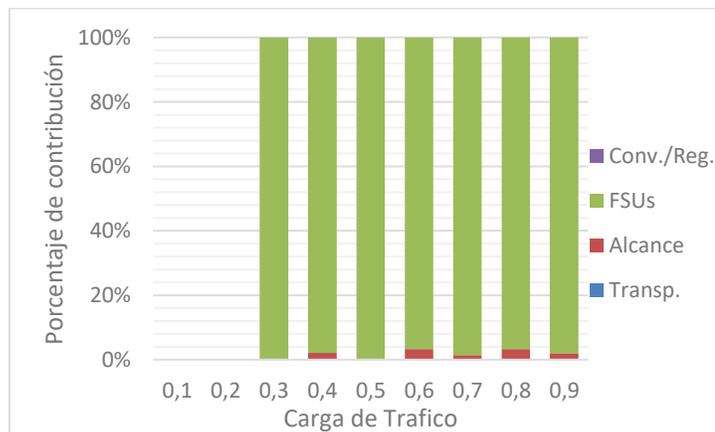


Figura 4-24 Contribución Probabilidad de Bloqueo con 12 Converters por nodo

Se observa que el incluir más de 6 convertors por nodo no produce variaciones significativas en los porcentajes de contribución en la probabilidad de bloqueo global.

## Discusión y conclusiones

Se simuló el funcionamiento del algoritmo RMLSA propuesto con la capacidad de regenerar/convertir el formato de modulación en algún nodo intermedio de una ruta. Este es un simulador de eventos discretos (programado en C++) que representa el proceso de reserva y liberación de recursos de las conexiones en una red óptica flexible dinámica (conexiones se establecen bajo demanda y por el tiempo necesario para enviar información) para obtener como resultado la probabilidad de bloqueo de la red para distintas cargas de tráfico. Las topologías de red usadas fueron la NSFNet (compuesta por 14 nodos y 21 enlaces bidireccionales) y EON (compuesta por 20 nodos y 39 enlaces bidireccionales).

El modelo de tráfico es del tipo ON-OFF, es decir, cada conexión tiene un periodo de actividad (inactividad) de acuerdo a una variable aleatoria exponencial con media  $T_{on}$  ( $T_{off}$ ). La carga de tráfico ofrecida por cada conexión a la red es  $\rho = T_{on}/(T_{on} + T_{off})$ , donde  $T_{on}$  fue definido como 1 [u.t.], y el  $T_{off}$  se adecúa para obtener valores de  $\rho$  de 0,1 a 0,9. Cabe mencionar que en este tipo de tráfico, entre cada par de nodos de la red sólo puede existir una conexión simultánea.

Al simulador, llegan peticiones de conexión para establecer una tasa de transmisión determinada entre pares de nodos de la red. El número de solicitudes de conexión simuladas fue de 10.000 por cada valor de carga de tráfico.

La capacidad de los enlaces se supone de 160, 240 y 320 FSUs. Teniendo en cuenta que el ancho de banda de cada FSUs es de 12,5 GHz, entonces, el ancho de banda total disponible de cada fibra óptica es de 2000, 3000 y 4000 GHz (Banda C completa) respectivamente.

El conjunto de tasas de transmisión disponibles en los transpondedores de la red,  $\beta$ , son 10, 40, 100, 400 y 1000 Gbps. Se supone, además, que las solicitudes de estas tasas se comportan de acuerdo a una distribución uniforme.

Se supone el uso de canales OFDM (conjunto de sub-portadoras ortogonales moduladas). La tasa de transmisión de cada sub-portadora se ajusta para que, en conjunto al formato de modulación, resulte en un ancho de banda igual a 12,5 GHz. De esta forma, el número de sub-portadoras se ajusta para alcanzar una tasa de transmisión deseada. El alcance de cada señal OFDM es la de una sub-portadora individual modulada.

El algoritmo de ruteo utilizado es K-SP, con  $K=3$ . El algoritmo de asignación de espectro es *First Fit* y el algoritmo de asignación de formato de modulación es el que busca el que tenga el menor ancho de banda tal que supere o iguale el alcance de la ruta o segmento analizado.

El rendimiento de la propuesta, en términos de probabilidad de bloqueo, A modo de comparación, se simuló el mismo algoritmo RMLSA pero sin la capacidad de conversión de formato de modulación en algún nodo intermedio.

De los gráficos expuestos en este trabajo se puede concluir que el algoritmo propuesto es capaz de reducir hasta en un 50% el número de peticiones bloqueadas, teniendo una disponibilidad de FSUs mayor o igual a 240 y un mínimo de 3 regeneradores por nodo. Esta disminución se debe a que la inclusión de convertidores/regeneradores reduce casi a 0 los bloqueos por alcance, y disminuye aproximadamente en un 60% promedio los bloqueos por FSUs.

Los resultados muestran la conveniencia de contar con algoritmos que permitan la posibilidad de usar regeneración/conversión de formato de modulación intermedio comparado con los algoritmos RMLSA tradicionales (sin regeneración). Para cargas de tráfico bajas, la propuesta obtiene una probabilidad de bloqueo de más de un orden de magnitud. Para cargas altas, el desempeño sigue siendo mejor, pero con una diferencia de menos de un orden de magnitud.

Con estos resultados, queda demostrada la conveniencia de usar algoritmos RMLSA, como el propuesto en este trabajo, para redes de amplia cobertura geográfica.

También se demostró que si a las topologías de red se disminuye la longitud de los enlaces al 50%. Al igual que en el caso anterior, el contar con algoritmos RMLSA con la capacidad de regenerar/convertir el formato de modulación sigue produciendo un mejor rendimiento en términos de probabilidad de bloqueo de hasta un orden de magnitud para cargas bajas. A cargas altas, sigue siendo más conveniente contar con la propuesta pero con beneficios menores. Considerando la disminución de la longitud de los enlaces, en términos generales, la probabilidad de bloqueo de todos los casos disminuye debido a que hay menos solicitudes de conexión que se rechazan debido a la restricción del alcance óptico.

# Bibliografía

- [1] I. Tomokos, E. Palkopoulou and E. Angelou, "A survey of recent developments on flexible/elastic optical networking," in *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2012)*, July 2012, pp. 1-6.
- [2] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord y S. Ben Yoo, «Elastic Optical Networking: a new dawn for the optical layer?,» *IEEE Communications*, vol. 50, nº 2, pp. S12-S20, Feb. 2012.
- [3] B. C. Chatterjee, N. Sarma and E. Oki, "Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial," *IEEE Communications Surveys & Tutorial*, vol. 17, no. 3, pp. 1776-1800, 2015.
- [4] Y. Wang, X. Cao y Y. Pan, «A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path,» de *30th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, Shangai, China, April 2011.
- [5] A. Fallahpour, H. Beyranvand y S. A. Nezamalhos, «Energy efficient routing and spectrum assignment with regenerator placement in elastic optical networks,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, nº 10, pp. 2019-2027, May 2014.
- [6] B. Chen , W. Xie, J. Zhang, J. P. Jue, Y. Zhao, S. Huang y W. Gu, «Energy and spectrum efficiency with multi-flow transponders and elastic regenerators in survivable flexible bandwidth virtual optical networks,» de *proc. of Optical Fiber Conference (OFC 2014)*, W2A.27, March 2014, pp. 1-3.
- [7] 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.
- [8] E. Lach y W. Idler, «Modulation formats for 100G and beyond,» *Optical Fiber Technology*, vol. 17, nº 5, pp. 377-386, October 2011.

- 
- [9] Finisar, *WDM Reference Guide*, 2008.
- [10] I.-T. R. G.694.1, *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid (2012)*, 2012.
- [11] Fujitsu, *DWDM Prerequisite Training*, 2002.
- [12] E. Desurvire, «Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications,» de *Wiley Series in Telecommunications and Signal*, 1994.
- [13] I. Tomkos, M. Angelou, R. Durán, I. de Miguel, R. Lorenzo, D. Siracusa, E. Salvadori, A. Tymecki, Y. Ye y I. Tafur, «Next Generation Flexible and Cognitive Heterogeneous Optical Networks,» Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 225-236.
- [14] S. Gringeri, «Flexible architectures for optical transport nodes and networks,» *IEEE*, vol. 48, nº 7, pp. 40-50, 2010.
- [15] N. Amaya, G. Zervas y D. Simeo, «Introducing Node Architecture Flexibility for Elastic Optical Networks,» *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, nº 6, pp. 593 - 608, June 2013.
- [16] P. Yuan y A. Xu, «The influence of physical network topologies on wavelength requirements in optical network,» *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, nº 9, 2010.
- [17] A. Leiva, Metodología de evaluación tecno-económica de procesos de migración en redes WDM, USM Valparaíso, 2013.
- [18] D. Hunter y I. Andonovic, «Approaches to Optical Internet Packet Switching,» *EEE Communications Magazine*, vol. 38, nº 9, pp. 116-122, 2000.
- [19] C. Qiao y M. Yoo, «Optical burst switching (OBS) – a new paradigm for an Optical Internet,» *Journal of High Speed Networks*, vol. 8, nº 1, pp. 69-84, March 1999.
- [20] M. Düser y P. Bayvel, «Analysis of a dynamically wavelength-routed optical burst switched network architecture,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, nº 4, p. 574–585, Apr. 2002.
- [21] A. Saleh y J. Simmons, «All-Optical Networking - Evolution, Benefits, Challenges, and Future Vision,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, nº 5, pp. 1105 - 1117, March 2012.
- [22] M. Tahon, S. Verbrugge, D. Colle, M. Pickavet, P. Wright y A. Lord, *Valuing Flexibility in the Migration to Flexgrid Networks*, Anaheim, California, USA: p. NTh11, 2013.

- [23] Y. Sakurai, Y. Hotta, S. Khan, H. Oguri, K. Takeuchi, S. Michihata y N. Uehara, «LCOS-Based Wavelength Blocker Array With Channel-by-Channel Variable Center Wavelength and Bandwidth,» *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, n° 14, p. 2011, 989-991.
- [24] F. Frisken, G. Baxter, D. Abakoumov, H. Zhou, I. Clarke y S. Poole, «Flexible and Grid-less Wavelength Selective Switch using LCOS Technology,» de *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC)*, Los Angeles, CA, USA, 2011.
- [25] M. Jinno, H. Takara, Y. Sone, K. Yonenaga y A. Hirano, «Multiflow optical transponder for efficient multilayer optical networking,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, n° 5, pp. 56-65, May 2012.
- [26] C. Politi, C. Matrakidis, T. Orphanoudakis, V. Anagnostopoulos y A. Stavdas, «Planning and operation of elastic flex-grid optical networks with OFDM variable bandwidth capabilities,» de *15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Cartagena, Spain,, 2013.
- [27] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, T. Yoshimatsu, T. Kobayashi, Y. Miyamoto, K. Yonenaga, A. Takada, O. Ishida y S. Matsuoka, «Demonstration of Novel Spectrum-Efficient Elastic Optical Path Network with Per-Channel Variable Capacity of 40 Gb/s to Over 400 Gb/s,» de *34th European Conference on Optical Communication, ECOC 2008.* , Brussels, Belgium, 2008.
- [28] V. López, O. González 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*, Lisbon, Portugal, 2013.
- [29] Fujitsu, *Next-Generation ROADM Architectures and Benefits*, March 2015.
- [30] A. Devarajan, K. Sandesha, R. Gowrishankar, B. Sai Kishore, G. Prasanna, R. Johnson y P. Voruganti, «Colorless, Directionless and Contentionless multi-degree ROADM architecture for mesh optical networks,» de *Second International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*, Bangalore, India, Jan. 2010.
- [31] M. Dallaglio, T. Zami, N. Sambo, A. Giorgetti, A. Pagano, E. Riccardi y P. Castoldi, «Add and Drop Architectures for MultiCarrier Transponders in EONs,» *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, n° 7, pp. A12 - A22, July 2016.
- [32] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos y E. Varvarigos, «Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, n° 9, pp. 1354-1366, Mayo 2011.

- 
- [33] A. Pages, J. Perelló y S. Spadaro, «Lightpath Fragmentation for Efficient Spectrum Utilization in Dynamic Elastic Optical Networks,» de *Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, Colchester, 2012, pp. 1-6.
- [34] H. Zang, J. P. Jue y B. Mukherjee, «A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks,» *Optical Networks Magazine*, vol. 1, n° 1, pp. 47-60, 2000.
- [35] S. Ramamurthy y B. Mukherjee, «Fixed-Alternate Routing and Wavelength Conversion in Wavelength-Routed Optical Networks,» *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 10, n° 3, pp. 351-367, 2002.
- [36] L. Li y A. K. Somani, «Dynamic wavelength routing using congestion and neighborhood information,» *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 7, n° 5, pp. 779-786, Oct. 1999.
- [37] L. Yang, H. Nan, Z. Xiaoping, Z. Hanyi y Z. Bingkun, «Polynomial-time adaptive routing algorithm based on spectrum scan in dynamic flexible optical networks,» *China Communications*, vol. 10, n° 4, pp. 49 - 58, April 2013.
- [38] 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, n° 6, pp. 1012-1018, Septiembre 2014.
- [39] M. Jinno, B. Kozicki, H. Takara y A. Watanabe, «Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network,» *Communications Magazine, IEEE*, vol. 48, n° 8, pp. 138-145, Agosto 2010.
- [40] H. Ding, M. Zhang, B. Ramamurthy, Z. Liu, S. Huang y X. Chen, «Routing, modulation level and spectrum allocation with dynamic modulation level conversion in elastic optical networks,» *Photonic Network Communications*, vol. 28, n° 3, pp. 295-305, Junio 2014.
- [41] T. Takagi, H. Hasegawa, K. Sato y T. Tanaka, «Algorithms for maximizing spectrum efficiency in elastic optical path network that adopt distance adaptive modulation,» de *36th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, Torino, 2010.
- [42] V. Marín, A. Leiva, A. Beghelli, F. Pizarro, R. Olivares y C. Garrido, «A RMLSA Algorithm for Wide-Area Flex-Optical Networks,» de *IEEE CHILECON*, Pucon, Chile, Oct. 2017.
- [43] V. Marín, A. Leiva, A. Beghelli, F. Pizarro y R. Olivares, «A RMLSA Algorithm for Translucent Elastic-Optical Networks,» de *Primer Congreso Nacional de Ingeniería Electrónica*, Concepción, Chile, Sep. 2017.

- 
- [44] A. M. Law y W. D. Kelton, *Simulation modeling and analysis*, 3rd ed, McGraw-Hill Higher Education, 2000.
- [45] J. López, Y. Ye, V. López, F. Jiménez, R. Duque y P. Krummrich, «Cost Evaluation for Flexible-Grid Optical Networks,» Anaheim, California, USA, Dec. 2012.
- [46] 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, nº s1, p. S10606, 2012.
- [47] Y. Zhao, J. Zhang, J. Wang y W. Gu, «PCE-based routing and spectrum assignment in OFDM-based bandwidth-variable optical networks,» de *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, Beijing,, April 2012, pp. 116-122.
- [48] X. Chu, B. Li y Z. Zhang, «A dynamic RWA algorithm in a wavelength-routed all-optical network with wavelength converters,» de *INFOCOM*, San Francisco, California, USA, 2013.

# A Papers

## A.1 Primer Congreso Nacional de Ingeniería Electrónica, UdeC 2017

*Abstract*— We propose a RMLSA (Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment) algorithm to establish connections in flexible optical networks that cover a wide geographical area. For this, and as it differs from the traditional RMLSA algorithms, the proposal allows the use of regenerators and / or modulation format converters in intermediate nodes of very extensive routes (translucent networks). Thus, it is expected to decrease the blocking probability connection requests.

We obtained the blocking probability vs. traffic load experienced by the EON topology using the algorithm proposed. By way of comparison, the case of a traditional RMLSA algorithm (without regeneration) was also simulated. The results show that in all traffic loads, the proposal obtains a lower blocking probability than the traditional counterpart and with differences on an order of magnitude (for low traffic loads).

Keywords—flexible optical networks, modulation format, RMLSA Algorithm.

### A.1.1 Introducción

Para establecer conexiones en redes ópticas flexibles [1-2], se hace necesario contar con algún algoritmo del tipo RMLSA (*Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment*) [1-3]. Esto es, ante una petición de conexión entre dos nodos de la red a una tasa de transmisión digital dada, el algoritmo debe encontrar la ruta (RA: *Routing Allocation*), el formato de modulación (MLA: *Modulation Level Allocation*) y la posición espectral (SA: *Spectrum Allocation*). En operación flexible, el espectro es dividido en pequeñas secciones de 12,5 GHz, denominadas FSU (*Frequency Slot Unit*) [3].

Los algoritmos RMLSA tradicionales buscan establecer una conexión óptica completamente transparente (sin regeneración intermedia) a través de una ruta que une los dos nodos que solicitaron transmisión de datos [3]. Sin embargo, esto es sólo posible para redes cuyos largos de rutas sean menores que los alcances de las señales. Para redes de gran extensión territorial, una conexión completamente transparente es casi imposible de realizar. Esto, por fenómenos ópticos

como el ruido ASE (*Amplified Spontaneous Emission*), el cual deteriora la OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*) de las señales y como consecuencia, aumenta el BER (*Bit Error Rate*) a la salida de los receptores finales.

El rechazo a una petición de conexión para los algoritmos RMLSA se debe a la falta de FSUs continuas y contiguas en el espectro a través de las rutas candidatas y a la imposibilidad de establecer una conexión óptica transparente. La primera causa es debido a la fragmentación del espectro (pequeños grupos de FSUs disponibles, aislados y no contiguos en el espectro en los enlaces de la red). La segunda causa es debido a que el alcance de la señal óptica es menor al largo de las rutas. De esta forma, se hace necesario adecuar a los algoritmos RMLSA tradicionales para disminuir la tasa de rechazos de solicitudes de conexión. De esta forma, en este artículo se propone un nuevo algoritmo RMLSA con la capacidad de utilizar regeneradores/conversores de modulación en nodos intermedios de las rutas, para así disminuir la probabilidad de bloqueo de la red.

La distribución de contenidos es la siguiente: en la sección II se presenta la propuesta de algoritmo RMLSA; en la sección III se muestran los resultados debido a la aplicación de la propuesta en una red real; y en la sección IV, las conclusiones.

### A.1.2 Algoritmo RMLSA propuesto

El algoritmo RMLSA propuesto utiliza: un algoritmo de ruteo del tipo  $K$ -SP; para la asignación de formatos de modulación busca la opción que obtenga el menor número de FSUs tal que su alcance óptico iguale o supere el largo de la ruta analizada y; para el algoritmo de asignación de espectro, la propuesta puede funcionar con cualquiera de los presentados ampliamente en la literatura. En la Fig. 1 se muestra un esquema general del algoritmo RMLSA propuesto.

Ante una petición de conexión entre un par de nodos ( $s$  al  $d$ ) considerando una tasa de transmisión  $B_{s,d}$ , el algoritmo opera en 2 etapas (A y B).

Etapas A: En esta etapa se analiza la factibilidad de establecer la solicitud de conexión dentro de alguna de las  $K$ -ésimas rutas más cortas y de manera transparente (completamente óptica). Para comprender la operación de la etapa A se definen los siguientes términos:

- $s$  y  $d$  son los nodos fuente y destino, respectivamente.
- $B_{s,d}$  es la tasa de transmisión solicitada entre nodos  $s$  al  $d$ .
- $\beta = \{B^1, B^2, \dots, B^u, \dots, B^U\}$  es el conjunto compuesto por las  $U$  tasas de transmisión disponibles en los transpondedores flexibles, donde  $B^u$  representa el  $u$ -ésimo elemento.
- $\mathcal{M} = \{M^1, M^2, \dots, M^j, \dots, M^J\}$  es el conjunto compuesto por los  $J$  formatos de modulación disponibles en los transpondedores flexibles, donde  $M^j$  representa el  $j$ -ésimo elemento.
- $\mathcal{R}_{s,d} = \{R_{s,d}^1, R_{s,d}^2, \dots, R_{s,d}^k, \dots, R_{s,d}^K\}$  es el conjunto compuesto por las  $K$  rutas candidatas (pre-calculadas) entre los nodos  $s$  al  $d$ , donde  $R_{s,d}^k$  representa la  $k$ -ésima ruta más corta.
- $\mathcal{L}_{s,d} = \{L_{s,d}^1, L_{s,d}^2, \dots, L_{s,d}^k, \dots, L_{s,d}^K\}$  es el conjunto de los largos, en km, de las rutas del conjunto  $\mathcal{R}_{s,d}$ , donde  $L_{s,d}^k$  representa el largo de la  $k$ -ésima ruta más corta.
- $\mathcal{FM}(L_{s,d}^k, B_{s,d})$  es el conjunto de formatos de modulación pertenecientes a  $\mathcal{M}$  que, en conjunto con la tasa de transmisión  $B_{s,d} \in \beta$ , tienen un alcance óptico mayor o igual a  $L_{s,d}^k$ .

- $\mathbb{F}SU[\mathcal{M}, \beta]$  es una matriz donde cada elemento  $\mathbb{F}SU[m, b]$  contiene el número de FSUs (ancho de banda) que se obtienen de la combinación entre el formato de modulación  $m$  y una tasa de transmisión  $b$ ,  $\forall m \in \mathcal{M}$  y  $b \in \beta$ .
- $\mathbb{U}(R_{s,d}^k)$  es el vector de disponibilidad de FSUs de la ruta  $R_{s,d}^k$ . El número de elementos de este vector está dado por el número total de FSUs de una fibra óptica.
- $\mathcal{F}SU[\mathbb{U}(R_{s,d}^k)]$  es el conjunto de FSUs disponibles y contiguos en el espectro en el vector  $\mathbb{U}(R_{s,d}^k)$ .
- $\|\mathcal{F}SU[\mathbb{U}(R_{s,d}^k)]\|_{\max}$  es el número máximo de FSUs contiguos y disponibles en el vector  $\mathbb{U}(R_{s,d}^k)$ .

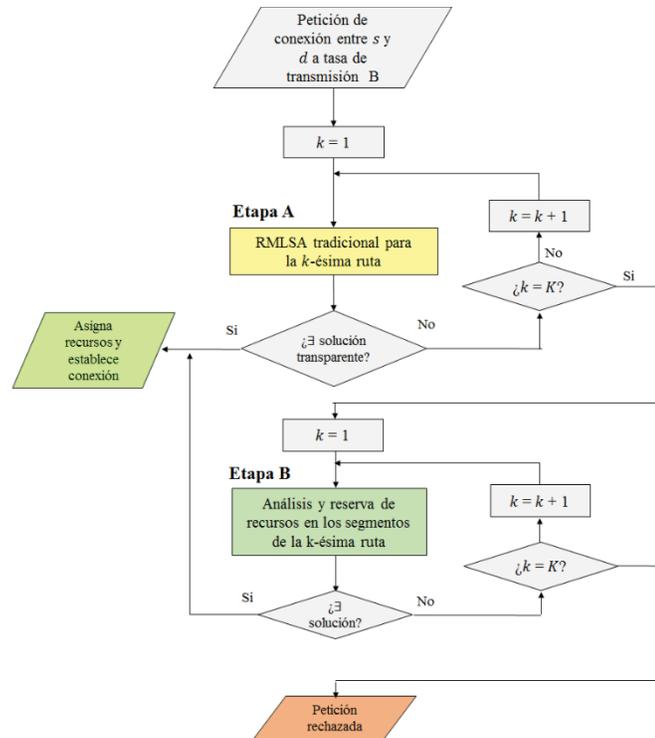


Figura A-1 Esquema del algoritmo RMLSA propuesto.

En la Fig. 2 se muestra el pseudo-código de la Etapa A. Para la ruta  $k$ -ésima,  $R_{s,d}^k$ , el algoritmo obtiene  $\mathcal{FM}(L_{s,d}^k, B_{s,d})$ . Si existen elementos en el conjunto, se escoge el formato de modulación que menor número de FSUs requiera (a través de  $\mathbb{F}SU[m, b]$ , tal que  $m \in \mathcal{FM}(L_{s,d}^k, B_{s,d})$  y  $b$  sea igual a  $B_{s,d}$ ). Con este número de FSUs, se ejecuta un algoritmo de asignación de espectro, buscando una porción de espectro contiguo y continuo (conexión transparente entre  $s$  y  $d$ ) que pueda contener a las FSUs requeridas a través de  $R_{s,d}^k$ . Si es posible encontrar una solución, se asignan los recursos para establecer la conexión. En caso contrario, intenta con la siguiente ruta más corta hasta que  $k = K$ . En El caso de no poder establecer una conexión transparente en alguna de las  $K$  rutas, se pasa a la Etapa B

**Etapa B:** Esta etapa se activa cuando no es posible establecer una conexión completamente óptica o transparente en ninguna de las  $K$  rutas pre-calculadas. En este caso, el algoritmo analiza

nuevamente las rutas candidatas buscando utilizar sólo un regenerador/conversor de formato de modulación en algún nodo intermedio de la ruta  $R_{s,d}^k$ .

Para comprender la etapa B se definen los siguientes términos:

- $N(R_{s,d}^k)$  es el número de nodos que componen la ruta  $R_{s,d}^k$ .
- $C(N_i)$  es el número de conversores/regeneradores disponibles (desocupados) en el nodo  $i$ -ésimo.
- $\mathcal{S}(R_{s,d}^k) = \{S^1(R_{s,d}^k), \dots, S^i(R_{s,d}^k), \dots, S^{N(R_{s,d}^k)-2}(R_{s,d}^k)\}$  es el conjunto de segmentos que componen la ruta  $R_{s,d}^k$ , donde cada uno tiene como origen el nodo  $s$  (fuente de la solicitud de conexión) y el nodo final es el  $i$ -ésimo anterior al nodo  $d$ .
- $\mathcal{S}(R_{s,d}^k)^* = \{S^1(R_{s,d}^k)^*, \dots, S^i(R_{s,d}^k)^*, \dots, S^{N(R_{s,d}^k)-2}(R_{s,d}^k)^*\}$  es el conjunto de segmentos que componen la ruta  $R_{s,d}^k$ , donde cada uno tiene como origen el nodo  $i$ -ésimo anterior al nodo  $d$  y el nodo final es el  $d$  (destino de la solicitud de conexión).
- $L[S^i(R_{s,d}^k)]$  y  $L[S^i(R_{s,d}^k)^*]$  son los largos, en km, de los segmentos  $S^i(R_{s,d}^k)$  y  $S^i(R_{s,d}^k)^*$ , respectivamente.
- $\mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)], B_{s,d})$  y  $\mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)^*], B_{s,d})$  son los conjuntos de formatos de modulación pertenecientes a  $\mathcal{M}$  que, en conjunto con la tasa de transmisión  $B_{s,d} \in \beta$ , tienen un alcance óptico mayor o igual a  $L[S^i(R_{s,d}^k)]$  y  $L[S^i(R_{s,d}^k)^*]$ , respectivamente.
- $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))$  y  $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)$  son los vectores de disponibilidad de FSUs del segmento  $S^i(R_{s,d}^k)$  y  $S^i(R_{s,d}^k)^*$ , respectivamente.
- $\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))]$  y  $\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)]$  son los conjuntos de FSUs disponibles y contiguos en el espectro en el vector  $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))$  y  $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)$ , respectivamente.
- $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))]\|_{\max}$  y  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)]\|_{\max}$  son los números máximos de FSUs contiguos y disponibles en los vectores  $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))$  y  $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)$ , respectivamente.

**Etapa A: Algoritmo RMLSA aplicado a la ruta  $R_{s,d}^k$ .**

- Obtener el conjunto  $\mathcal{FM}(L_{s,d}^k, B_{s,d})$
- **if**  $\mathcal{FM}(L_{s,d}^k, B_{s,d}) \neq \emptyset$  **then**
  - Seleccionar el formato de modulación  $m \in \mathcal{FM}(L_{s,d}^k, B_{s,d})$  relacionado a  $\mathbb{FSU}[m, b]_{\min}$ , el cual corresponde al menor valor en  $\mathbb{FSU}[m, b]$  tal que  $b = B_{s,d}$ .
  - Obtener  $\mathbb{U}(R_{s,d}^k)$ .
  - Obtener  $\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(R_{s,d}^k)]$
  - Obtener  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(R_{s,d}^k)]\|_{\max}$
  - **If**  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(R_{s,d}^k)]\|_{\max} \geq \mathbb{FSU}[m, b]_{\min}$  **then**
    - Ejecutar algoritmo SA (asignación de espectro).
    - Reservar recursos // *existe solución transparente.*
- Else**
  - Salir de la etapa A.
- else**
  - Salir de la etapa A.

Figura A-2 Pseudo-código de etapa A en algoritmo propuesto.

En la Fig. 3 se muestra el pseudo-código de la Etapa B. El algoritmo divide la ruta  $k$ -ésima en dos segmentos. En la primera iteración, el primer segmento es conformado desde el nodo origen hasta un nodo anterior al nodo final (por la misma ruta), y el segundo segmento es el correspondiente al tramo no cubierto por el segmento anterior. De esta forma, el algoritmo trata de establecer la conexión de manera independiente en ambos segmentos, es decir, suponiendo

que en el nodo final del primer segmento (o inicial del segundo segmento) existe un conversor de formato de modulación disponible capaz de escoger el formato de modulación y la posición espectral de la conexión óptica independientemente de lo que se escoja en el otro segmento de la ruta. Si no es posible establecer la conexión en los dos segmentos de la ruta, se vuelve a iniciar esta etapa pero con otros dos segmentos de la ruta. Esto se repite hasta agotar las posibilidades de analizar 2 segmentos de la ruta. Si finalmente no es posible establecer la conexión con alguna combinación de dos segmentos en la ruta  $k$ -ésima  $R_{s,d}^k$ , el algoritmo reinicia la etapa B pero con la siguiente ruta candidata. Todo esto, hasta analizar la última ruta  $k = K$ . En caso de no encontrar solución en ninguna de las rutas candidatas, el algoritmo rechaza la petición de conexión.

```

Etapa B: Algoritmo RMLSA en segmentos de ruta.
i = 1
If  $i \leq N(R_{s,d}^k) - 2$  then
  If  $C(N_i) \neq 0$  then
    - Obtener  $S^i(R_{s,d}^k)$ .
    - Obtener  $L[S^i(R_{s,d}^k)]$ 
    - Obtener  $\mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)], B_{s,d})$ 
    - if  $\mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)], B_{s,d}) \neq \emptyset$  then
      • Seleccionar el formato de modulación  $m \in \mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)], B_{s,d})$  relacionado a  $\mathbb{FSU}[m, b]_{min}$ , el cual corresponde al menor valor en  $\mathbb{FSU}[m, b]$  tal que  $b = B_{s,d}$ .
      • Obtener  $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))$ .
      • Obtener  $\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))]$ 
      • Obtener  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))]\|_{max}$ 
      • If  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))]\|_{max} \geq \mathbb{FSU}[m, b]_{min}$  then
        • Ejecutar algoritmo SA en  $S^i(R_{s,d}^k)$  y reservar recursos.
        • Obtener  $S^i(R_{s,d}^k)^*$ : complemento de  $S^i(R_{s,d}^k)$ .
        • Obtener  $L[S^i(R_{s,d}^k)^*]$ 
        • Obtener  $\mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)^*], B_{s,d})$ 
        • If  $\mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)^*], B_{s,d}) \neq \emptyset$  then
          ~ Seleccionar el formato de modulación  $m \in \mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)^*], B_{s,d})$  relacionado a  $\mathbb{FSU}[m, b]_{min}$ .
          ~ Obtener  $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)$ .
          ~ Obtener  $\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)]$ 
          ~ Obtener  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)]\|_{max}$ 
          ~ If  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)]\|_{max} \geq \mathbb{FSU}[m, b]_{min}$  then
            * Ejecutar algoritmo SA en  $S^i(R_{s,d}^k)^*$  y reservar recursos.
            * Salir de la Etapa B.
          ~ else
            * Se liberan recursos reservados.
            * Iniciar nuevamente la Etapa B pero con  $i=i+1$ 
        • else
          ~ Se liberan los recursos reservados.
          ~ Iniciar nuevamente la Etapa B pero con  $i=i+1$ 
      • else
        • Iniciar nuevamente la Etapa B, pero con  $i = i + 1$ .
    - Else
      • Iniciar nuevamente la Etapa B pero con  $i=i+1$ 
  else
    • Iniciar nuevamente la Etapa B pero con  $i=i+1$ 
Else
  - Salir de la Etapa B.
  
```

Figura A-3 Pseudo-código de etapa B del algoritmo propuesto.

### A.1.3 Resultados

Se simuló el funcionamiento del algoritmo RMLSA propuesto con la capacidad de regenerar/convertir el formato de modulación en algún nodo intermedio de una ruta. Este es un simulador de eventos discretos (programado en C++) que representa el proceso de reserva y liberación de recursos de las conexiones en una red óptica flexible dinámica (conexiones se establecen bajo demanda y por el tiempo necesario para enviar información) para obtener como resultado la probabilidad de bloqueo de la red para distintas cargas de tráfico. La topología de red usada es la EON (compuesta por 20 nodos y 39 enlaces bidireccionales [5]).

El modelo de tráfico es del tipo ON-OFF, es decir, cada conexión tiene un periodo de actividad (inactividad) de acuerdo a una variable aleatoria exponencial con media  $T_{on}$  ( $T_{off}$ ). La carga de tráfico ofrecida por cada conexión a la red es  $\rho = T_{on}/(T_{on} + T_{off})$ , donde  $T_{on}$  fue definido como 1 [u.t.], y el  $T_{off}$  se adecúa para obtener valores de  $\rho$  de 0,1 a 0,9.

Al simulador, llegan peticiones de conexión para establecer una tasa de transmisión determinada entre pares de nodos de la red. El número de solicitudes de conexión simuladas fue de 10.000 por cada valor de carga de tráfico.

La capacidad de los enlaces se supone de 320 FSUs. El ancho de banda total disponible de cada fibra óptica es de 4000 GHz (Banda C completa).

El conjunto de tasas de transmisión disponibles en los transpondedores de la red,  $\beta$ , son 10, 40, 100, 400 y 1000 Gbps. Se supone, además, que las solicitudes de estas tasas se comportan de acuerdo a una distribución uniforme.

Para construir los conjuntos  $\mathcal{FM}(\cdot)$  y la matriz  $\mathbb{FSU}[\mathcal{M}, \beta]$  se utiliza la Tabla I [4]. Para construir esta tabla, se supone el uso de canales OFDM. La tasa de transmisión de cada sub-portadora se ajusta para que, en conjunto al formato de modulación, resulte en un ancho de banda igual a 12,5 GHz. De esta forma, el número de sub-portadoras se ajusta para alcanzar una tasa de transmisión deseada. El alcance de cada señal OFDM es la de una sub-portadora individual modulada.

Tabla A-1 Requerimiento de ancho de banda (fsu) y alcance obtenido de señales OFDM para las distintas combinaciones de formato de modulación y tasa de transmisión.

	Número de FSUs necesarias					Alcance [km]
	10 Gbps	40 Gbps	100 Gbps	400 Gbps	1000 Gbps	
BPSK	1	4	8	32	80	4000
QPSK	1	2	4	16	40	2000
8-QAM	1	2	3	11	27	1000
16QAM	1	1	2	8	20	500
32QAM	1	1	2	7	16	250
64QAM	1	1	2	6	14	125

El algoritmo de ruteo utilizado es K-SP, con  $K=3$ . El algoritmo de asignación de espectro es *First Fit* y el algoritmo de asignación de formato de modulación es el que busca el que tenga el menor ancho de banda tal que supere o iguale el alcance de la ruta o segmento analizado.

El rendimiento de la propuesta, en términos de probabilidad de bloqueo, se muestra en las Fig. 4, para distintos valores de carga de tráfico y para distintos valores de número máximo de regeneradores/conversores de formato de modulación por nodos. A modo de comparación, se simuló el mismo algoritmo RMLSA tradicional (sin la capacidad de conversión de formato de modulación).

Para cargas de tráfico bajas, la propuesta obtiene una probabilidad de bloqueo de más de un orden de magnitud. Para cargas altas, el desempeño sigue siendo mejor, pero con una diferencia de menos de un orden de magnitud. En cuanto al número de regeneradores por nodo, el poseer un número mayor de conversores implica un desempeño ligeramente mejor. Con estos resultados, queda demostrada la conveniencia de usar algoritmos RMLSA, como el propuesto en este artículo, para redes de amplia cobertura geográfica.

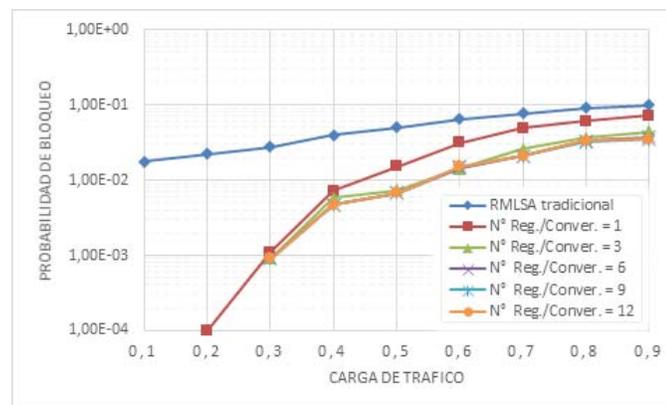


Figura A-4 Probabilidad de bloqueo de un algoritmo RMLSA tradicional y del algoritmo RMLSA propuesto con regeneradores por nodo aplicado a la EON.

### A.1.4 Conclusiones

Se propuso un algoritmo RMLSA para ser aplicado en redes ópticas flexibles de área extensa. Este algoritmo, además de elegir la ruta, el formato de modulación y la ubicación espectral de una conexión óptica, permite ocupar un regenerador/conversor de formato de modulación en un nodo intermedio de una ruta candidata. Así, es posible disminuir la tasa de bloqueo que experimentan las solicitudes de conexión debido a la falta de FSUs disponibles continuos y contiguos y por la gran longitud de las rutas que superan el alcance óptico de las señales.

Se demuestra que la inclusión de algoritmos como el propuesto en este artículo pueden ocasionar mejoras de la probabilidad de bloqueo de hasta más de un orden de magnitud.

Trabajos futuros deben estar centrados en ampliar los análisis de este artículo como por ejemplo: nivel de fragmentación, otros modelos de tráfico, entre otros.

### A.1.5 Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero de los siguientes proyectos: FONDECYT n° 11140386 y PUCV 204.719/2014.

### A.1.6 References

- [1] I. Tomkos, E. Palkopoulou, M. Angelou, "A survey of recent developments on flexible/elastic optical networking," in International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2012), pp. 1-6, July 2012.
- [2] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, S.J. Ben Yoo, "Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?", IEEE Communications Magazine, vol. 50, n° 2, pp. S12-S20, Feb. 2012.
- [3] B. C. Chatterjee, N. Sarma, E. Oki, "Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial", IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, n° 3, pp. 1776 – 1800, 2015.
- [4] D. Garrido, A. Leiva, A. Beghelli, R. Ahumada, R. Olivares, "Routing, Code, Modulation Level and Spectrum Assignment (RCMLSA) Algorithm for Elastic Optical Networks", in International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2016), pp. 1-6, July 2016
- [5] X. Chu, Li B., and Z. Zhang, "A dynamic RWA algorithm in a wavelength-routed all-optical network with wavelength converters," in INFOCOM, San Francisco, California, USA, 2003, pp. 1795 - 1804.

## A.2 IEEE CHILECON 2017, Pucón

*Abstract*— In this paper we propose a RMLSA (Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment) algorithm to establish connections in flexible optical networks that cover a wide geographical area. For this, and as it differs from the traditional RMLSA algorithms, the proposal allows the use of regenerators and / or modulation format converters in intermediate nodes of very extensive routes. Thus, it is expected to decrease the blocking probability connection requests.

A discrete event simulator was developed that represents the process of reserving and releasing resource connections in a flexible optical network. The input parameters to this simulator are: the RMLSA algorithm, traffic load, network topology (with link lengths), bit-rates and modulation formats (with their bandwidth tables and optical reach) of the transponders and the number of regenerators in the nodes.

We obtained the blocking probability vs. traffic load experienced by the NSFNet topology using the algorithm proposed with 5 and 15 regenerators per node. By way of comparison, the case of a traditional RMLSA algorithm (without regeneration) was also simulated. The results show that in all traffic loads, the proposal obtains a lower blocking probability than the traditional counterpart and with differences on an order of magnitude (low traffic loads).

This proposal and results may be of interest to telecommunication operators who are considering the possibility of migrating their networks to ones of the flexible type.

*Keywords*—flexible optical networks, modulation format, RMLSA Algorithm.

### A.2.1 Introducción

Actualmente, la tecnología DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) es la usada por los operadores de telecomunicaciones para sus redes de área amplia. Esto, debido que son la única tecnología capaz de soportar la creciente demanda de tráfico de datos [1]. Estas redes están compuestas por nodos y enlaces DWDM, donde es posible transmitir varias señales ópticas a longitudes de onda (o frecuencias) distintas para que puedan propagarse por una misma fibra óptica sin interferirse [1]. Estas señales modulan portadoras ópticas dentro de la banda C de comunicaciones ópticas (entre 1530 a 1565 nm).

La distribución de portadoras ópticas se realiza en base a una grilla fija, en donde la separación espectral entre cada una de ellas puede tomar valores de 200 GHz, 100 GHz, 50 GHz o 25 GHz, según la Rec. G.694.1 de la ITU-T. La separación espectral más usada comercialmente es la de 50 GHz. En la Fig. 1.a se muestra el espectro de un enlace DWDM con 4 señales ópticas a distintos bit-rates. Se puede apreciar que la separación entre portadoras (flechas negras verticales) es fija e igual a 50 GHz.

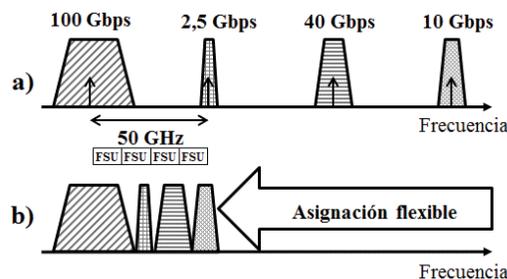


Figura A-5 Espectro de un enlace de fibra óptica con a) grilla fija o b) grilla flexible de frecuencias.

De la Fig. 1.a se puede apreciar que un gran monto de espectro no es usado, debido a que las señales no utilizan los 50 GHz de ancho de banda disponible para cada una de ellas. Esta ineficiencia del uso del espectro por parte de las redes DWDM con grilla fija limitaría el número máximo de conexiones simultáneas que se podrían transmitir por una misma fibra óptica.

Como solución a la ineficiencia de las redes ópticas de rejilla fija, en los últimos años se ha propuesto operar de manera flexible. En este novedoso tipo de operación, no existe una grilla con frecuencias pre-fijadas y la posición central de las señales se define según el ancho de banda de cada señal. Este tipo de redes se le denomina redes ópticas flexibles [1,2]. En la Fig. 1.b se muestran las mismas 4 señales del ejemplo de la Fig.1.a pero operando de manera flexible, quedando demostrado el potencial ahorro de espectro.

En las redes ópticas flexibles, el espectro es dividido en pequeñas porciones denominadas FSU (*Frequency Slot Unit*) [1-4]. El valor ampliamente usado en la literatura para el ancho de banda de un FSU es igual a 12,5 GHz. En la Fig. 1 se puede apreciar este concepto.

Para hacer efectiva la operación en redes flexibles se hacen necesarios dispositivos flexibles (transmisores sintonizables en frecuencia y formato de modulación, y conmutadores/filtros flexibles) y nuevos algoritmos de asignación de recursos para atender peticiones de conexión. Este artículo trata sobre estos últimos, los cuales se denominan algoritmos RMLSA (*Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment*) [4].

Ante una petición de conexión a un bit-rate entre 2 nodos, los algoritmos RMLSA tienen la misión de determinar la ruta, el formato de modulación y la posición espectral de la señal óptica a establecer. Usualmente, estos algoritmos operan de manera secuencial, es decir, primeramente resuelven el problema del ruteo, posteriormente el del formato de modulación y finalmente, la posición espectral de la conexión [4].

El algoritmo de ruteo (RA) más usado en la literatura es el del tipo fijo-alternado, y en particular, el  $K$ -SP ( $K$ -Shortest Path o las  $K$ -rutas más cortas, donde  $K$  usualmente se encuentra entre 1 a 3) [4]. El algoritmo trata de establecer la conexión, intentando desde la ruta más corta hasta la  $K$ -ésima ruta más corta. El algoritmo de asignación de formato y/o nivel de modulación (MLA) más usado es aquel que resulte en el menor ancho de banda (menor número de FSUs) tal que su alcance sea igual o mayor al largo de la ruta. Finalmente, y teniendo la información del número de FSUs necesarias debido al MLA, se activa el algoritmo de asignación de la ubicación espectral (SA). El más usado es el *First-Fit* [4], el cual asigna los FSUs en la primera porción de espectro que

encuentre disponible partiendo desde la parte más baja del espectro, tal que se cumplan las condiciones de continuidad (los FSUs asignados deben ser los mismos a través de toda la ruta) y contigüidad (los FSU deben estar juntos en el espectro).

Los algoritmos RMLSA buscan establecer una conexión óptica completamente transparente (sin regeneración intermedia) a través de una ruta que une los dos nodos que solicitaron transmisión de datos [4]. Sin embargo, esto es sólo posible para redes cuyos largos de rutas sean menores que los alcances de las señales. Para redes de gran extensión territorial, una conexión completamente transparente es casi imposible de realizar. Esto, por fenómenos ópticos como el ruido ASE (*Amplified Spontaneous Emission*), el cual deteriora la OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*) de las señales y como consecuencia, aumenta el BER (*Bit Error Rate*) a la salida de los receptores finales.

El rechazo a una petición de conexión para los algoritmos RMLSA se debe a la falta de FSUs continuas y contiguas en el espectro a través de las rutas candidatas y a la imposibilidad de establecer una conexión óptica transparente. La primera causa es debido a la fragmentación del espectro (pequeños grupos de FSUs disponibles, aislados y no contiguos en el espectro en los enlaces de la red). La segunda causa es debido a que el alcance de la señal óptica es menor al largo de las rutas (redes de amplia cobertura geográfica). De esta forma, se hace necesario adecuar a los algoritmos RMLSA tradicionales para disminuir la tasa de rechazos de solicitudes de conexión.

En [5] se propone un algoritmo para establecer conexiones ópticas en la cual se busca escoger la alternativa con menor consumo energético tal que cumpla con un BER umbral y sin regeneración. En el caso de no poder establecer una conexión completamente óptica, el algoritmo selecciona un regenerador en algún nodo intermedio tal que minimice el consumo de energía eléctrica en toda la red. La propuesta fue evaluada en términos de probabilidad de bloqueo, consumo energético y aplicada a 2 topologías de red reales. Sin embargo, los regeneradores intermedios carecen de la capacidad de convertir el formato de modulación. En [6] se plantea un algoritmo para establecer redes virtuales sobre una red óptica flexible considerando un tráfico semi-estático. La finalidad de esta propuesta es minimizar el consumo energético y al ancho de banda usado. Sin embargo, no se analiza un escenario dinámico (en donde las conexiones se establecen y liberan bajo demanda), y por lo mismo, no analiza el impacto de su propuesta en la tasa de rechazos (probabilidad de bloqueo). Dado los artículos analizados, en este trabajo se propone un algoritmo RMLSA con la capacidad de regenerar y convertir el formato de modulación en nodos intermedios de una ruta. Así, sería posible disminuir la tasa de rechazos debido a la falta de FSUs disponibles continuos y contiguos, y por problemas con el alcance óptico de las señales.

La distribución de contenidos es la siguiente: en la sección II se presenta la propuesta de algoritmo RMLSA; en la sección III se muestran los resultados debido a la aplicación de la propuesta en una red real; y en la sección IV se presentan las conclusiones.

### **A.2.2 Algoritmo RMLSA propuesto**

El algoritmo RMLSA propuesto utiliza: un algoritmo de ruteo del tipo  $K$ -SP; para la asignación de formatos de modulación busca la opción que obtenga el menor número de FSUs tal que su alcance óptico iguale o supere el largo de la ruta analizada y; para el algoritmo de asignación de

espectro, la propuesta puede funcionar con cualquiera de los presentados ampliamente en la literatura. En la Fig. 2 se muestra un esquema general del algoritmo RMLSA propuesto.

Ante una petición de conexión entre un par de nodos ( $s$  al  $d$ ) considerando una tasa de transmisión  $B_{s,d}$ , el algoritmo opera en 2 etapas (A y B).

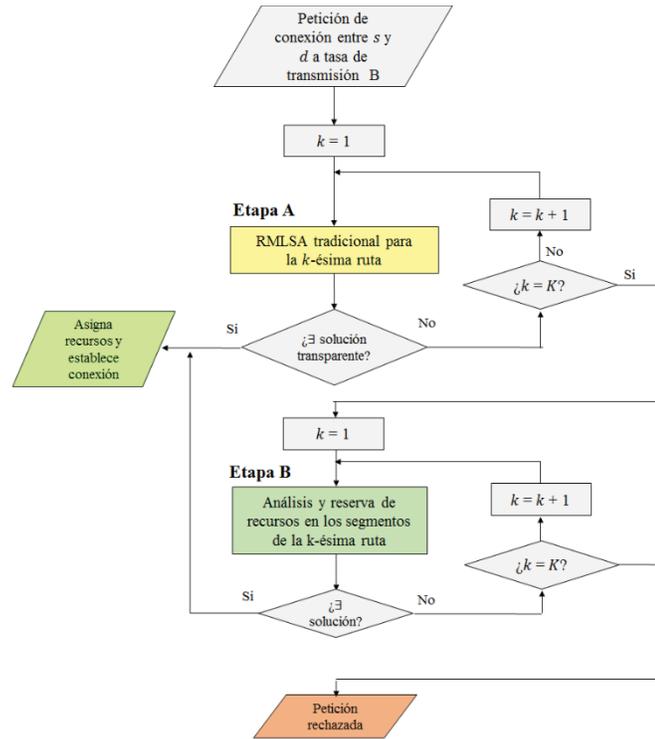


Figura A-6 Esquema del algoritmo RMLSA propuesto.

**Etapa A:** En esta etapa se analiza la factibilidad de establecer la solicitud de conexión dentro de alguna de las  $K$ -ésimas rutas más cortas y de manera transparente (completamente óptica). Para comprender la operación de la etapa A se definen los siguientes términos:

- $s$  es el nodo fuente.
- $d$  es el nodo destino.
- $B_{s,d}$  es la tasa de transmisión solicitada entre nodos  $s$  al  $d$ .
- $\beta = \{B^1, B^2, \dots, B^u, \dots, B^U\}$  es el conjunto compuesto por las  $U$  tasas de transmisión disponibles en los transpondedores flexibles, donde  $B^u$  representa el  $u$ -ésimo elemento.
- $\mathcal{M} = \{M^1, M^2, \dots, M^j, \dots, M^J\}$  es el conjunto compuesto por los  $J$  formatos de modulación disponibles en los transpondedores flexibles, donde  $M^j$  representa el  $j$ -ésimo elemento.
- $\mathcal{R}_{s,d} = \{R_{s,d}^1, R_{s,d}^2, \dots, R_{s,d}^k, \dots, R_{s,d}^K\}$  es el conjunto compuesto por las  $K$  rutas candidatas (precalculadas) entre los nodos  $s$  al  $d$ , donde  $R_{s,d}^k$  representa la  $k$ -ésima ruta más corta.
- $\mathcal{L}_{s,d} = \{L_{s,d}^1, L_{s,d}^2, \dots, L_{s,d}^k, \dots, L_{s,d}^K\}$  es el conjunto de los largos, en km, de las rutas del conjunto  $\mathcal{R}_{s,d}$ , donde  $L_{s,d}^k$  representa el largo de la  $k$ -ésima ruta más corta.
- $\mathcal{FM}(L_{s,d}^k, B_{s,d})$  es el conjunto de formatos de modulación pertenecientes a  $\mathcal{M}$  que, en conjunto con la tasa de transmisión  $B_{s,d} \in \beta$ , tienen un alcance óptico mayor o igual a  $L_{s,d}^k$ .
- $\mathbb{FSU}[\mathcal{M}, \beta]$  es una matriz donde cada elemento  $\mathbb{FSU}[m, b]$  contiene el número de FSUs

- (ancho de banda) que se obtienen de la combinación entre el formato de modulación  $m$  y una tasa de transmisión  $b$ ,  $\forall m \in \mathcal{M}$  y  $b \in \beta$ .
- $\mathbb{U}(R_{s,d}^k)$  es el vector de disponibilidad de FSUs de la ruta  $R_{s,d}^k$ . El número de elementos de este vector está dado por el número total de FSUs de una fibra óptica.
- $\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(R_{s,d}^k)]$  es el conjunto de FSUs disponibles y contiguos en el espectro en el vector  $\mathbb{U}(R_{s,d}^k)$ .
- $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(R_{s,d}^k)]\|_{\max}$  es el número máximo de FSUs contiguos y disponibles en el vector  $\mathbb{U}(R_{s,d}^k)$ .

En la Fig. 3 se muestra el pseudo-código de la Etapa A. Para la ruta  $k$ -ésima,  $R_{s,d}^k$ , el algoritmo obtiene  $\mathcal{FM}(L_{s,d}^k, B_{s,d})$ . Si existen elementos en el conjunto, se escoge el formato de modulación que menor número de FSUs requiera (a través de  $\mathbb{FSU}[m, b]$ , tal que  $m \in \mathcal{FM}(L_{s,d}^k, B_{s,d})$  y  $b$  sea igual a  $B_{s,d}$ ). Con este número de FSUs, se ejecuta un algoritmo de asignación de espectro, buscando una porción de espectro contiguo y continuo (conexión transparente entre  $s$  y  $d$ ) que pueda contener a las FSUs requeridas a través de  $R_{s,d}^k$ . Si es posible encontrar una solución, se asignan los recursos para establecer la conexión. En caso contrario, intenta con la siguiente ruta más corta hasta que  $k = K$ . En El caso de no poder establecer una conexión transparente en alguna de las  $K$  rutas, se pasa a la Etapa B.

**Etapa A: Algoritmo RMLSA aplicado a la ruta  $R_{s,d}^k$ .**

- Obtener el conjunto  $\mathcal{FM}(L_{s,d}^k, B_{s,d})$
- **if**  $\mathcal{FM}(L_{s,d}^k, B_{s,d}) \neq \emptyset$  **then**
  - Seleccionar el formato de modulación  $m \in \mathcal{FM}(L_{s,d}^k, B_{s,d})$  relacionado a  $\mathbb{FSU}[m, b]_{\min}$ , el cual corresponde al menor valor en  $\mathbb{FSU}[m, b]$  tal que  $b = B_{s,d}$ .
  - Obtener  $\mathbb{U}(R_{s,d}^k)$ .
  - Obtener  $\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(R_{s,d}^k)]$
  - Obtener  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(R_{s,d}^k)]\|_{\max}$
  - **If**  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(R_{s,d}^k)]\|_{\max} \geq \mathbb{FSU}[m, b]_{\min}$  **then**
    - Ejecutar algoritmo SA (asignación de espectro).
    - Reservar recursos // *existe solución transparente.*
- Else**
  - Salir de la etapa A
- else**
  - Salir de la etapa A.

Figura A-7 Pseudo-código de etapa A en algoritmo propuesto, correspondiente a un algoritmo RMLSA tradicional.

**Etapa B:** Esta etapa se activa cuando no es posible establecer una conexión completamente óptica o transparente en ninguna de las  $K$  rutas pre-calculadas. En este caso, el algoritmo analiza nuevamente las rutas candidatas buscando utilizar sólo un regenerador/conversor de formato de modulación en algún nodo intermedio de la ruta  $R_{s,d}^k$ .

Para comprender la etapa B se definen los siguientes términos:

- $N(R_{s,d}^k)$  es el número de nodos que componen la ruta  $R_{s,d}^k$ .
- $\mathcal{S}(R_{s,d}^k) = \{S^1(R_{s,d}^k), \dots, S^i(R_{s,d}^k), \dots, S^{N(R_{s,d}^k)-2}(R_{s,d}^k)\}$  es el conjunto de segmentos que

- componen la ruta  $R_{s,d}^k$ , donde cada uno tiene como origen el nodo  $s$  (fuente de la solicitud de conexión) y el nodo final es el  $i$ -ésimo anterior al nodo  $d$ .
- $\mathcal{S}(R_{s,d}^k)^* = \{S^1(R_{s,d}^k)^*, \dots, S^i(R_{s,d}^k)^*, \dots, S^{N(R_{s,d}^k)-2}(R_{s,d}^k)^*\}$  es el conjunto de segmentos que componen la ruta  $R_{s,d}^k$ , donde cada uno tiene como origen el nodo  $i$ -ésimo anterior al nodo  $d$  y el nodo final es el  $d$  (destino de la solicitud de conexión).
  - $L[S^i(R_{s,d}^k)]$  y  $L[S^i(R_{s,d}^k)^*]$  son los largos, en km, de los segmentos  $S^i(R_{s,d}^k)$  y  $S^i(R_{s,d}^k)^*$ , respectivamente.
  - $\mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)], B_{s,d})$  y  $\mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)^*], B_{s,d})$  son los conjuntos de formatos de modulación pertenecientes a  $\mathcal{M}$  que, en conjunto con la tasa de transmisión  $B_{s,d} \in \beta$ , tienen un alcance óptico mayor o igual a  $L[S^i(R_{s,d}^k)]$  y  $L[S^i(R_{s,d}^k)^*]$ , respectivamente.
  - $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))$  y  $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)$  son los vectores de disponibilidad de FSUs del segmento  $S^i(R_{s,d}^k)$  y  $S^i(R_{s,d}^k)^*$ , respectivamente.
  - $\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))]$  y  $\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)]$  son los conjuntos de FSUs disponibles y contiguos en el espectro en el vector  $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))$  y  $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)$ , respectivamente.
  - $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))]\|_{\max}$  y  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)]\|_{\max}$  son los números máximos de FSUs contiguos y disponibles en los vectores  $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))$  y  $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)$ , respectivamente.

En la Fig. 4 se muestra el pseudo-código de la Etapa B. El algoritmo divide la ruta  $k$ -ésima en dos segmentos. En la primera iteración, el primer segmento es conformado desde el nodo origen hasta un nodo anterior al nodo final (por la misma ruta), y el segundo segmento es el correspondiente al tramo no cubierto por el segmento anterior. De esta forma, el algoritmo trata de establecer la conexión de manera independiente en ambos segmentos, es decir, suponiendo que en el nodo final del primer segmento (o inicial del segundo segmento) existe un conversor de formato de modulación disponible capaz de descubrir el formato de modulación y la posición espectral de la conexión óptica independientemente de lo que se escoja en el otro segmento de la ruta. Si no es posible establecer la conexión en los dos segmentos de la ruta, se vuelve a iniciar esta etapa pero con otros dos segmentos de la ruta. Esto se repite hasta agotar las posibilidades de analizar 2 segmentos de la ruta. Si finalmente no es posible establecer la conexión con alguna combinación de dos segmentos en la ruta  $k$ -ésima  $R_{s,d}^k$ , el algoritmo reinicia la etapa B pero con la siguiente ruta candidata. Todo esto, hasta analizar la última ruta  $k = K$ . En caso de no encontrar solución en ninguna de las rutas candidatas, el algoritmo rechaza la petición de conexión.

### A.2.3 Resultados

Se simuló el funcionamiento del algoritmo RMLSA propuesto con la capacidad de regenerar/convertir el formato de modulación en algún nodo intermedio de una ruta. Este es un simulador de eventos discretos (programado en C++) que representa el proceso de reserva y liberación de recursos de las conexiones en una red óptica flexible dinámica (conexiones se establecen bajo demanda y por el tiempo necesario para enviar información) para obtener como resultado la probabilidad de bloqueo de la red para distintas cargas de tráfico. La topología de red usada es la NSFNet, la cual se muestra en la Fig. 5. (compuesta por 14 nodos y 21 enlaces bidireccionales). Además, se pueden apreciar las longitudes de los enlaces en km.

```

Etapa B: Algoritmo RMLSA en segmentos de ruta.
i = 1
If  $i \leq N(R_{s,d}^k) - 2$  then
- Obtener  $S^i(R_{s,d}^k)$ .
- Obtener  $L[S^i(R_{s,d}^k)]$ 
- Obtener  $\mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)], B_{s,d})$ 
- if  $\mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)], B_{s,d}) \neq \emptyset$  then
  - Seleccionar el formato de modulación  $m \in \mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)], B_{s,d})$  relacionado a  $\mathbb{FSU}[m, b]_{min}$ , el cual corresponde al menor valor en  $\mathbb{FSU}[m, b]$  tal que  $b = B_{s,d}$ .
  - Obtener  $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))$ .
  - Obtener  $\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))]$ 
  - Obtener  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))]\|_{max}$ 
  - If  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k))]\|_{max} \geq \mathbb{FSU}[m, b]_{min}$  then
    - Ejecutar algoritmo SA en  $S^i(R_{s,d}^k)$  y reservar recursos.
    - Obtener  $S^i(R_{s,d}^k)^*$ : complemento de  $S^i(R_{s,d}^k)$ .
    - Obtener  $L[S^i(R_{s,d}^k)^*]$ 
    - Obtener  $\mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)^*], B_{s,d})$ 
    - If  $\mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)^*], B_{s,d}) \neq \emptyset$  then
      ~ Seleccionar el formato de modulación  $m \in \mathcal{FM}(L[S^i(R_{s,d}^k)^*], B_{s,d})$  relacionado a  $\mathbb{FSU}[m, b]_{min}$ .
      ~ Obtener  $\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)$ .
      ~ Obtener  $\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)]$ 
      ~ Obtener  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)]\|_{max}$ 
      ~ If  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(S^i(R_{s,d}^k)^*)]\|_{max} \geq \mathbb{FSU}[m, b]_{min}$  then
        * Ejecutar algoritmo SA en  $S^i(R_{s,d}^k)^*$  y reservar recursos.
        * Salir de la Etapa B.
      ~ else
        * Se liberan recursos reservados.
        * Iniciar nuevamente la Etapa B pero con  $i=i+1$ 
    - else
      ~ Se liberan los recursos reservados.
      ~ Iniciar nuevamente la Etapa B pero con  $i=i+1$ 
  - else
    - Iniciar nuevamente la Etapa B, pero con  $i = i + 1$ .
- Else
  - Iniciar nuevamente la Etapa B pero con  $i=i+1$ 
Else
- Salir de la Etapa B.

```

Figura A-8 Pseudo-código de etapa B del algoritmo propuesto.

El modelo de tráfico es del tipo ON-OFF, es decir, cada conexión tiene un periodo de actividad (inactividad) de acuerdo a una variable aleatoria exponencial con media  $T_{on}$  ( $T_{off}$ ). La carga de tráfico ofrecida por cada conexión a la red es  $\rho = T_{on}/(T_{on} + T_{off})$ , donde  $T_{on}$  fue definido como 1 [u.t.], y el  $T_{off}$  se adecúa para obtener valores de  $\rho$  de 0,1 a 0,9. Cabe mencionar que en este tipo de tráfico, entre cada par de nodos de la red sólo puede existir una conexión simultánea.

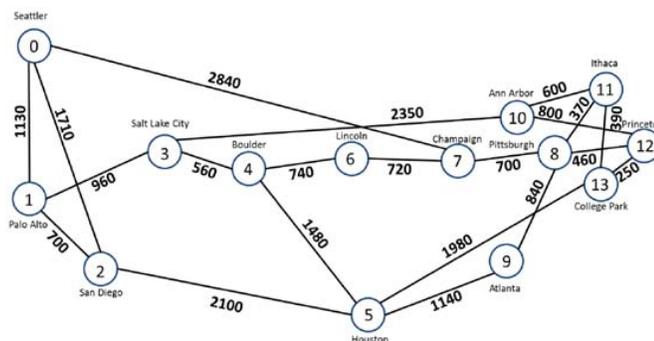


Figura A-9 Topología de red NSFNet.

Al simulador, llegan peticiones de conexión para establecer una tasa de transmisión determinada entre pares de nodos de la red. El número de solicitudes de conexión simuladas fue de 10.000 por cada valor de carga de tráfico.

La capacidad de los enlaces se supone de 320 FSUs. Teniendo en cuenta que el ancho de banda de cada FSUs es de 12,5 GHz, entonces, el ancho de banda total disponible de cada fibra óptica es de 4000 GHz (Banda C completa).

El conjunto de tasas de transmisión disponibles en los transpondedores de la red,  $\beta$ , son 10, 40, 100, 400 y 1000 Gbps. Se supone, además, que las solicitudes de estas tasas se comportan de acuerdo a una distribución uniforme.

Para construir los conjuntos  $\mathcal{FM}(\cdot)$  y la matriz  $\mathbb{FSU}[\mathcal{M}, \beta]$  se utiliza la Tabla I [7]. Para construir esta tabla, se supone el uso de canales OFDM (conjunto de sub-portadoras ortogonales moduladas). La tasa de transmisión de cada sub-portadora se ajusta para que, en conjunto al formato de modulación, resulte en un ancho de banda igual a 12,5 GHz. De esta forma, el número de sub-portadoras se ajusta para alcanzar una tasa de transmisión deseada. El alcance de cada señal OFDM es la de una sub-portadora individual modulada.

Tabla A-2 Requerimiento de ancho de banda (fsu) y alcance obtenido de señales OFDM para las distintas combinaciones de formato de modulación y tasa de transmisión

	Número de FSUs necesarias					Alcance [km]
	10 Gbps	40 Gbps	100 Gbps	400 Gbps	1000 Gbps	
BPSK	1	4	8	32	80	4000
QPSK	1	2	4	16	40	2000
8-QAM	1	2	3	11	27	1000
16QAM	1	1	2	8	20	500
32QAM	1	1	2	7	16	250
64QAM	1	1	2	6	14	125

El algoritmo de ruteo utilizado es K-SP, con K=3. El algoritmo de asignación de espectro es *First Fit* y el algoritmo de asignación de formato de modulación es el que busca el que tenga el menor ancho de banda tal que supere o iguale el alcance de la ruta o segmento analizado.

El rendimiento de la propuesta, en términos de probabilidad de bloqueo, se muestra en la Fig. 6 para distintos valores de carga de tráfico y para distintos valores de número máximo de regeneradores/conversores de formato de modulación por nodos: 5 (círculo) y 15 (triángulo). A modo de comparación, se simuló el mismo algoritmo RMLSA pero sin la capacidad de conversión de formato de modulación en algún nodo intermedio (cuadrado).

Los resultados muestran la conveniencia de contar con algoritmos que permitan la posibilidad de usar regeneración/conversión de formato de modulación intermedio comparado con los algoritmos RMLSA tradicionales (sin regeneración). Para cargas de tráfico bajas, la propuesta obtiene una probabilidad de bloqueo de más de un orden de magnitud. Para cargas altas, el desempeño sigue siendo mejor, pero con una diferencia de menos de un orden de magnitud. En cuanto al número de regeneradores por nodo, el poseer 15 implica un desempeño ligeramente mejor que poseer 5. Con estos resultados, queda demostrada la conveniencia de usar algoritmos RMLSA, como el propuesto en este artículo, para redes de amplia cobertura geográfica.

En la Fig. 7 se muestra el impacto en la probabilidad de bloqueo de los mismos casos de la Fig. 6 pero si en la red NSFNet se disminuye la longitud de los enlaces al 50%. Al igual que en la Fig. 6, el contar con algoritmos RMLSA con la capacidad de regenerar/convertir el formato de modulación sigue produciendo un mejor rendimiento en términos de probabilidad de bloqueo de hasta un orden de magnitud para cargas bajas. A cargas altas, sigue siendo más conveniente contar con la propuesta pero con beneficios menores. Considerando la disminución de la longitud de los enlaces, en términos generales, la probabilidad de bloqueo de todos los casos disminuye debido a que hay menos solicitudes de conexión que se rechazan debido a la restricción del alcance óptico.

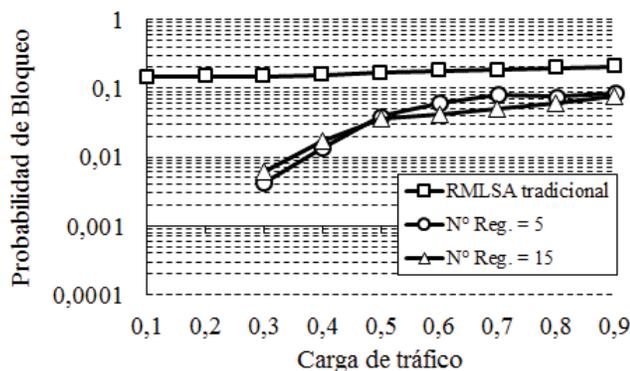


Figura A-80 Probabilidad de bloqueo de un algoritmo RMLSA tradicional (cuadrado) y del algoritmo RMLSA propuesto con 5 (círculos) y 15 (triángulo) regeneradores por nodo aplicado a la NSFNet.

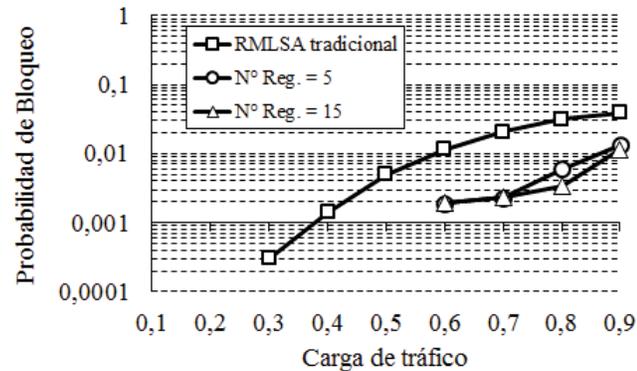


Figura A-11 Probabilidad de bloqueo de un algoritmo RMLSA tradicional (cuadrado) y del algoritmo RMLSA propuesto con 5 (círculos) y 15 (triángulo) regeneradores por nodo aplicado a la NSFNet pero con un factor de reducción de la longitud de los enlaces del 50%.

## A.2.4 Conclusiones

Se propuso un algoritmo RMLSA para ser aplicado en redes ópticas flexibles de área extensa. Este algoritmo, además de elegir la ruta, el formato de modulación y la ubicación espectral de una conexión óptica, permite ocupar un regenerador/conversor de formato de modulación en un nodo intermedio de una ruta candidata. Así, es posible disminuir la tasa de bloqueo que experimentan las solicitudes de conexión debido a la falta de FSUs disponibles continuos y contiguos y por la gran longitud de las rutas que superan el alcance óptico de las señales.

Se demuestra que la inclusión de algoritmos como el propuesto en este artículo pueden ocasionar mejoras de la probabilidad de bloqueo de hasta más de un orden de magnitud.

Trabajos futuros deben estar centrados en ampliar los análisis de este artículo como por ejemplo: distintos largos de rutas, distinto número de regeneradores por nodo, nivel de fragmentación, otras topologías de red, otros modelos de tráfico, entre otros.

## A.2.5 Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero de los siguientes proyectos: FONDECYT n° 11140386 y PUCV 204.719/2014.

## A.2.6 References

- [1] I. Tomkos, E. Palkopoulou, M. Angelou, "A survey of recent developments on flexible/elastic optical networking," in International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2012), pp. 1-6, July 2012.
- [2] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, S.J. Ben Yoo, "Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?," IEEE Communications Magazine, vol. 50, n° 2, pp. S12-S20, Feb. 2012.
- [3] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, S. Matsuoka, "Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies," IEEE Communications Magazine, vol. 47, n°11, p. 66-73, Nov. 2009.

- [4] B. C. Chatterjee, N. Sarma, E. Oki, "Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, n° 3, pp. 1776 – 1800, 2015.
- [5] A. Fallahpour, H. Beyranvand, S. A. Nezamalhosseini, and J. A. Salehi, "Energy efficient routing and spectrum assignment with regenerator placement in elastic optical networks", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, n° 10, pp. 2019- 2027, May 2014
- [6] B. Chen, W. Xie, J. Zhang, J. P. Jue, Y. Zhao, S. Huang, W. Gu, "Energy and spectrum efficiency with multi-flow transponders and elastic regenerators in survivable flexible bandwidth virtual optical networks", in *proc. of Optical Fiber Conference (OFC 2014)*, W2A.27, pp. 1-3, March 2014.
- [7] D. Garrido, A. Leiva, A. Beghelli, R. Ahumada, R. Olivares, "Routing, Code, Modulation Level and Spectrum Assignment (RCMLSA) Algorithm for Elastic Optical Networks", in *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2016)*, pp. 1-6, July 2016.