

# A RMLSA Algorithm for Wide-Area Flex-Optical Networks

Vicente Marín G.  
*Escuela de Ingeniería Eléctrica  
Pontificia Universidad Católica  
de Valparaíso*  
Valparaíso, Chile  
vicente.marin.g@mail.pucv.cl

Ariel Leiva L.  
*Escuela de Ingeniería Eléctrica  
Pontificia Universidad Católica  
de Valparaíso*  
Valparaíso, Chile  
ariel.leiva@pucv.cl

Alejandra Beghelli Z.  
*Facultad de Ingeniería y  
Ciencias*  
Universidad Adolfo Ibañez  
Viña del Mar, Chile  
alejandra.beghelli@uai.cl

Francisco Pizarro T.  
*Escuela de Ingeniería Eléctrica  
Pontificia Universidad Católica  
de Valparaíso*  
Valparaíso, Chile  
francisco.pizarro.t@pucv.cl

Ricardo Olivares Veliz  
Departamento de Electrónica  
Universidad Técnica Federico  
Santa María  
Valparaíso, Chile  
ricardo.olivares@usm.cl

César Garrido E.  
*Escuela de Ingeniería Eléctrica  
Pontificia Universidad Católica  
de Valparaíso*  
Valparaíso, Chile  
cesar.garrido.e@mail.pucv.cl

**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.

## I. 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.

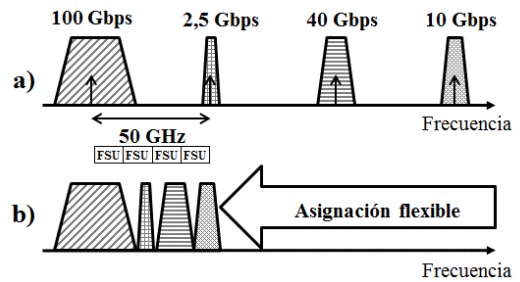


Figura 1: Espectro de un enlace de fibra óptica con a) grilla fija o b) grilla flexibles de frecuencias.

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.

## II. 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).

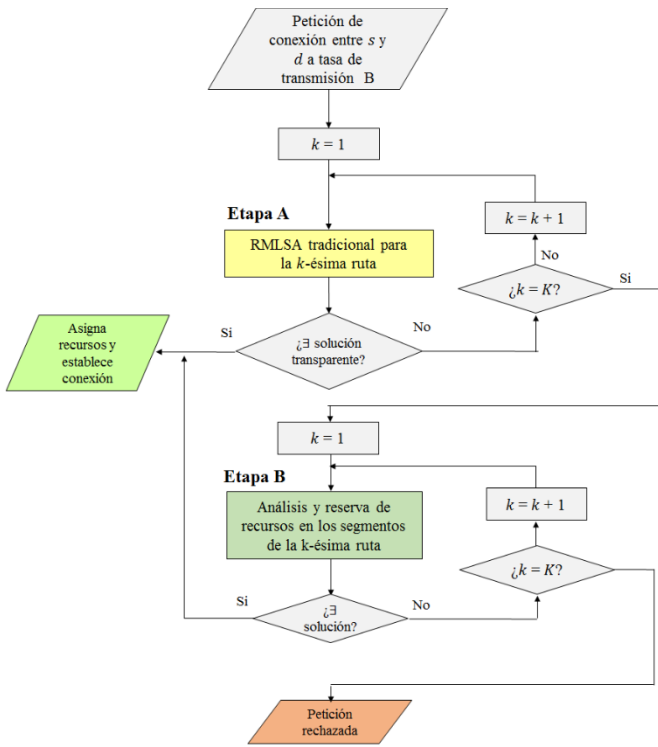


Figura 2: Esquema del algoritmo RMLSA propuesto.

**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 (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  $L_{s,d}^k$ .

- $\text{FSU}[\mathcal{M}, \beta]$  es una matriz donde cada elemento  $\text{FSU}[m, b]$  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  $\text{FSU}[m, b]$ , 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  $\text{FSU}[m, b]_{\min}$ , el cual corresponde al menor valor en  $\text{FSU}[m, b]$  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**  $\|\mathcal{FSU}[\mathbb{U}(R_{s,d}^k)]\|_{\max} \geq \text{FSU}[m, b]_{\min}$  **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 3: 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

#### 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**

- Salir de la Etapa B.

Figura 4: Pseudo-código de etapa B del algoritmo propuesto.

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.

### III. 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.

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 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.

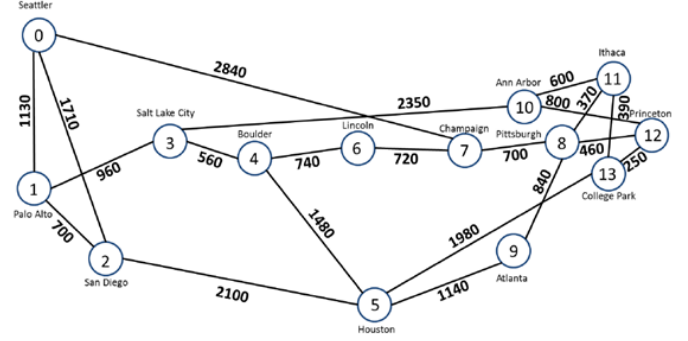


Figura 5: Topología de red NSFNet.

TABLA I: 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.

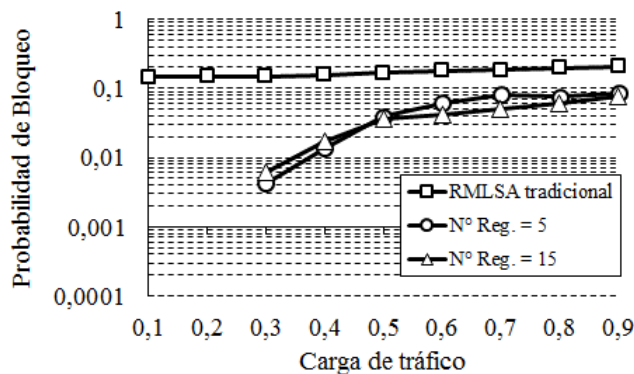


Figura 6: Probabilidad de bloqueo de un algoritmo RMLSA tradicional (cuadrado) y del algoritmo RMLSA propuesto con 5 (círculos) y 15 (triángulo) regeneradores por nodo aplicado a la NSFNet.

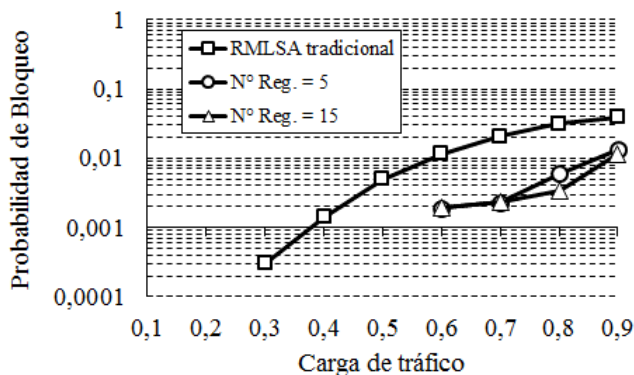


Figura 7: Probabilidad de bloqueo de un algoritmo RMLSA tradicional (cuadrado) y del algoritmo RMLSA propuesto con 5 (círculos) y 15 (triángulo) regeneradores por nodo aplicado a la NSFNet pero con un factor de reducción de la longitud de los enlaces del 50%.

#### IV. 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.

#### AGRADECIMIENTOS

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

#### 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.