

A Joint RSA Algorithm for Dynamic Flexible Optical Networking

A. Leiva, N. Pavez, A. Beghelli and R. Olivares

Abstract— We propose a novel algorithm to solve the Routing and Spectrum Allocation (RSA) problem in dynamic flexible grid optical networks. Unlike most previous proposals, the algorithm solves the R and SA problems jointly by exhaustively searching the solution space and taking the network state into account. As a result, the shortest possible path with enough spectrum availability is allocated to establish the connections. Simulation results show that, in terms of blocking ratio, our proposal significantly outperforms previously proposed algorithms. In some cases, the performance is better by more than one order of magnitude.

Keywords— Dynamic optical networks, flexible grid, Routing and Spectrum Allocation.

I. INTRODUCCIÓN

ACTUALMENTE, las redes de transporte DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) son la mejor alternativa para afrontar la creciente demanda del tráfico de internet. La transmisión de datos en las redes DWDM se lleva a cabo a través del envío de diferentes señales de información que modulan diferentes portadoras ópticas (cada una definida por una frecuencia o longitud de onda específica) por una misma fibra óptica. La frecuencia central de cada portadora óptica está definida por la Recomendación G.694.1 de la ITU (*International Telecommunications Union*), la que define 4 valores de separación espectral fija entre cada portadora óptica en torno a los 1550 nm: 100 GHz, 50 GHz, 25 GHz o 12.5 GHz. La separación espectral más usada entre canales ópticos es la de 50 GHz, la cual permite establecer señales a tasas de transmisión digital de 2.5, 10, 40 y 100 Gbps [1]. En la Fig. 1.a, se muestra un ejemplo del uso del espectro de un enlace DWDM que incluye 4 canales con distintas tasas de transmisión digital (100, 40, 10 y 2.5 Gbps) usando una separación espectral de 50 GHz.

A pesar de que experimentalmente se han implementado enlaces con capacidades sobre un 1 Tbps en redes DWDM [2], se prevé que con la actual separación espectral fija no será posible acomodar la demanda de tráfico de datos en un futuro cercano [3]. El crecimiento exponencial del tráfico de datos de Internet (con tasas de crecimiento anual de 35 a 50% [4]) y su alta heterogeneidad (con peticiones de conexión a muy distintas velocidades de transmisión digital [5], entre 2.5 Gbps y 1000 Gbps según [6]) son las razones principales detrás de esta predicción.

En las redes ópticas cuya asignación de espectro se hace utilizando una separación fija entre portadoras (típicamente, de 50 GHz), la heterogeneidad de las tasas de transmisión de las conexiones podría impedir un uso eficiente del espectro óptico. Por ejemplo, en la Fig. 1.a se puede observar que una conexión de 2.5 Gbps usa una pequeña porción del espectro asignado mientras que las conexiones de 100 Gbps usan todo el espectro asignado. Por lo tanto, esta separación de 50 GHz no es suficiente para acomodar conexiones de 400 Gbps o mayores. Para permitir el establecimiento de conexiones de 400 Gbps y mayores, es necesario incrementar la separación espectral entre portadoras ópticas (por ejemplo, 100 GHz). Sin embargo, si se usa la misma separación espectral para todas las conexiones, una parte significativa del espectro sería subutilizado para conexiones con velocidades de transmisión bajo 100 Gbps, las que requieren un menor ancho de banda que el asignado.

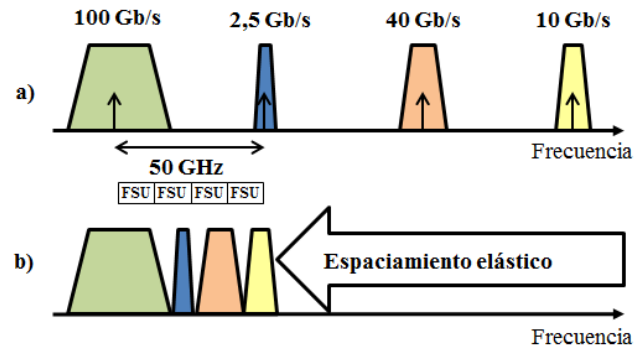


Figura 1: Espectro de un DWDM a) con una separación fija y b) elástica/flexible entre canales.

Con la finalidad de hacer frente a las desventajas de la asignación del espectro con separación fija entre portadoras y afrontar el futuro volumen de tráfico de datos en las redes ópticas, en los últimos años se ha propuesto asignar el espectro de manera flexible. Esto es, a las diferentes conexiones ópticas se les asigna espectro de acuerdo a la velocidad de transmisión digital y a la distancia a cubrir [7]. Este tipo de redes han sido nombradas como “redes ópticas flexibles o elásticas” [8,9], y se espera que dejen obsoleta la operación de asignación fija del espectro basada en la Recomendación G.694.1 de la ITU.

Una red óptica elástica consiste en un grupo de nodos y enlaces de fibra óptica con dispositivos capaces de trabajar de una manera “elástica” o “flexible” [10,11,12]. Es decir, los distintos dispositivos ópticos (por ejemplo, transmisores, receptores, transpondedores y conmutadores ópticos [13]) se pueden configurar dinámicamente de manera tal que pueden generar, operar y recibir señales ópticas a diferentes tasas de transmisión digital, distintos formatos de modulación (que, en conjunto con la tasa de transmisión digital, determina el ancho

A. Leiva, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), Valparaíso, Chile. ariel.leiva@ucv.cl

N. Pavez, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), Valparaíso, Chile. nicolas.pavez.n@mail.pucv.cl

A. Beghelli, Universidad Adolfo Ibáñez (UAI), Viña del Mar, Chile. alejandra.beghelli@uai.cl

R. Olivares, Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), Valparaíso, Chile. ricardo.olivares@usm.cl

de banda de la señal) y a distintas frecuencias portadoras de acuerdo a la distancia a cubrir por la conexión [14]. La Fig. 1b muestra un ejemplo del uso flexible del espectro en un enlace de una red óptica para las mismas 4 conexiones de la Fig. 1a. Note que la separación espectral entre conexiones y la frecuencia portadora de cada una de ellas se asignó flexiblemente. De esta manera, la operación flexible mejora la eficiencia en el uso del espectro en comparación con las actuales redes DWDM, debido a que elimina el espectro ocioso entre las portadoras asignadas de manera pre-establecida de la Rec. G.694.1 de la ITU. Como resultado de esto, es posible asignar un mayor número de conexiones ópticas ayudando a mitigar el problema gatillado por el incremento de demanda de tráfico en un futuro cercano.

Para asignar el espectro de forma flexible, el espectro se divide en segmentos pequeños llamados *Frequency Slots Units* (FSUs) [10]. Un FSU es la mínima porción de espectro asignable en una comunicación a través de una fibra óptica en particular (por ejemplo, 12,5 GHz). La Fig. 2a muestra un esquemático del espectro de un enlace de una red óptica flexible. En este caso, la porción de espectro mostrada se divide en 16 FSU's, cada una con un ancho de banda de 12,5 GHz. La Fig. 2b muestra un ejemplo de la asignación flexible de espectro a 3 conexiones con diferentes requerimientos de ancho de banda en términos de FSU's.

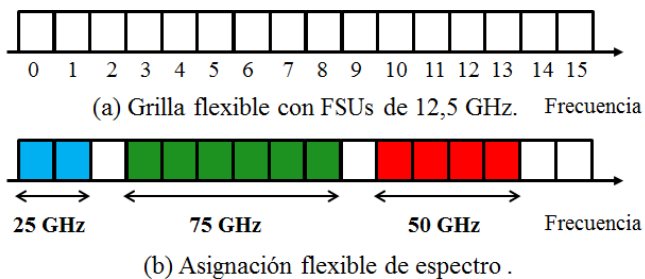


Figura 2. a) Ilustración del concepto de FSU y b) ejemplo de una asignación flexible de FSU's.

El uso de redes ópticas flexibles involucra cambios en la operación de las redes. Uno de los más importantes se refiere a la asignación de ruta y espectro a las peticiones de conexión. Esta problemática, conocida como RSA (*Routing and Spectrum Assignment*) [5-10], consiste en encontrar y asignar espectro disponible (frecuencia central y suficiente espectro contiguo en términos de FSU's) en cada enlace de una ruta candidata para establecer una conexión óptica entre dos nodos.

Para resolver el problema RSA, se debe cumplir con 3 restricciones. La primera restricción, restricción de contigüidad, exige que las FSU's asignadas a una conexión deben ser contiguas en el espectro. La segunda, restricción de continuidad, exige que exactamente las mismas FSU's (número y posición en el espectro) sean asignadas en todos los enlaces que componen una ruta. Finalmente, la tercera restricción establece que una misma FSU en un enlace no puede ser asignada a más de una conexión a la vez.

Existen dos enfoques para resolver el problema RSA: en el enfoque estático, las conexiones se establecen de manera permanente y el principal objetivo es minimizar el uso del

espectro; en el enfoque dinámico, las conexiones se establecen sólo por el tiempo que se requiere enviar información y el principal objetivo es minimizar el número de peticiones rechazadas o bloqueadas. Debido a que las redes con operación dinámica se adaptan de mejor manera a cambios de tráfico y topologías, y debido su potencial uso eficiente del espectro en comparación con el caso estático, este artículo se enfoca en redes con operación dinámica.

El problema RSA en redes ópticas dinámicas y elásticas es resuelto típicamente en 2 etapas secuenciales: primero, se asigna una ruta (por ejemplo, el camino más corto) y luego, se asigna una porción de espectro disponible en los enlaces que componen la ruta escogida (por ejemplo, la primera porción de espectro que se encuentre disponible al revisar el espectro de izquierda a derecha). En términos generales, la tasa de rechazo de este tipo de algoritmos secuencial es mayor que la de los algoritmos que resuelven la asignación de ruta y espectro de manera conjunta, como en [15]. En este artículo, se propone un algoritmo que resuelve el problema RSA de manera conjunta y adaptiva. Los resultados de simulación muestran que la tasa de rechazos de este nuevo algoritmo es significativamente menor que los obtenidos por los algoritmos previamente propuestos en la literatura.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección II se describen propuestas previas para resolver el problema RSA; en la sección III se presentan los modelos de tráfico y de red supuestos en este artículo; en la sección IV se presenta el algoritmo propuesto; en la sección V se presentan los resultados de simulación y finalmente, se presentan las conclusiones en la sección VI.

II. TRABAJOS PREVIOS

A continuación se revisan las propuestas hechas para algoritmos RSA secuenciales (R+SA) y conjuntos.

- Algoritmos R+SA

Este tipo de abordaje separa el problema RSA en dos problemas más simples: primero se resuelve el problema del ruteo (R) y luego, se ejecuta el algoritmo de asignación de espectro (SA) en la ruta seleccionada. El algoritmo de ruteo más común es k -SP (k -Shortest Path), donde las k rutas más cortas entre cada par de nodos se pre-computan y se almacenan en una tabla de ruteo. Respecto de los algoritmos SA, los más mencionados en la literatura son *Random Fit* (RF) y *First-Fit* (FF). RF asigna una porción de espectro seleccionada aleatoriamente, lo que resulta en un alto nivel de fragmentación del espectro [15] (debido al proceso de conexión y desconexión, el espectro queda fragmentado o con pequeñas porciones separadas disponibles en las que muchas veces no es posible establecer nuevas conexiones). FF, en cambio, asigna el espectro de manera ordenada, asignando la primera porción de espectro disponible que encuentre al revisar el espectro de izquierda a derecha. Debido a la mayor fragmentación de espectro, RF obtiene una tasa de rechazos mayor que FF [15,16]. Recientemente, los algoritmos *Best Fit* (BF) y *Bit Rate Aware Fit* (BRAFF) se han propuesto en [16] con el objetivo de considerar las

diferentes tasas de transmisión (i.e. diferente número de FSUs requeridas) de los requerimientos de conexión. Estos algoritmos exhiben una probabilidad de bloqueo menor que FF y RF, como se demuestra en [16]. BF disminuye la fragmentación al asignar la porción de espectro más pequeña con suficiente número de FSU's disponibles. BRAF divide el espectro en dos zonas. Las conexiones se asignan siguiendo la política de FF, revisando el espectro de izquierda a derecha para asigna las conexiones de baja tasa de transmisión y de derecha a izquierda para las conexiones de altas tasas de transmisión. Al hacer esto, la fragmentación del espectro disminuye. En términos de tasa de rechazo, el algoritmo BRAF obtiene mejores resultados que BF.

Los algoritmos R+SA limitan la búsqueda de espectro a las rutas ya almacenadas. Esto los hace computacionalmente más simples que buscar en toda la red, pero a expensas de una tasa de rechazos mayor.

-Algoritmos RSA conjunto.

Este tipo de algoritmo busca porciones disponibles de espectro en un gran número de las rutas posibles de manera simultánea. Esta técnica de búsqueda lo hace más complejo que los algoritmos de tipo secuencial, pero con un mayor rendimiento. En [15] se propuso un algoritmo RSA conjunto llamado MPSC (*Maximize Path Spectrum Consecutiveness*) que obtiene una menor tasa de rechazos que algoritmos RSA basados en FF y RF. El algoritmo evalúa el impacto de establecer una conexión en diferentes combinaciones de rutas y porciones de espectro (a una combinación específica se le conoce como *spectrum path* o camino espectral) en términos de una medida llamada "consecutividad de espectro". El camino espectral con el mayor valor de consecutividad de espectro se selecciona para establecer la conexión.

Todas las propuestas de algoritmos RSA (ya sean secuenciales o conjuntos) consideran un número fijo de rutas a explorar (normalmente, no más de 5 [17]), sin considerar el estado de la red al momento de procesar la solicitud de establecimiento de la conexión (para el caso de RSA secuencial). Dada la naturaleza dinámica del tráfico, no considerar el estado de la red puede limitar el rendimiento del algoritmo.

En este artículo, se propone un nuevo algoritmo que no limita su búsqueda a un conjunto pre-determinado de rutas. En cambio, se evalúa cada camino espectral posible y se selecciona el que utilice la menor cantidad de recursos (medido en número total de FSU's).

III. MODELOS DE RED Y TRÁFICO

A. Modelo de red

Una red óptica flexible es representada por un grafo $G = (\mathcal{N}, \mathcal{C})$, donde \mathcal{N} es el conjunto de nodos ópticos y \mathcal{C} es el conjunto de enlaces que conectan a los nodos. El número de elementos en los conjuntos \mathcal{N} y \mathcal{C} es representado por $|\mathcal{N}|$ y $|\mathcal{C}|$, respectivamente. Cada nodo óptico $n \in \mathcal{N}$ está localmente conectado a un dispositivo electrónico a través de un conjunto de transpondedores (de transmisión y recepción) de ancho banda variable (BVT: *Bandwidth Variable*

Transponders). El número de BVT's de recepción se supone igual al número de BVT's de transmisión, el cual corresponde a $(|\mathcal{N}| - 1)$ por cada nodo. Es decir, cada nodo es equipado con un par de BVT (uno para recepción y uno para transmisión) para cada nodo de destino posible. Cada enlace $c \in \mathcal{C}$ está compuesto por dos fibras ópticas, una en cada dirección. El conjunto de fibras ópticas es denominado por \mathcal{L} y el número de elementos de \mathcal{L} es denominado por $|\mathcal{L}|$. El número de FSUs de cada fibra óptica l se denomina por $|FSU|_{max}$.

B. Modelo de Tráfico

Cada conexión es representada por un par de nodos fuente-destino (i, j) , $i, j \in \mathcal{N}$. Cada par de nodos genera un tráfico de acuerdo a un proceso ON-OFF [18]. Es decir, el nodo fuente transmite información, a una tasa de transmisión dada y a un formato de modulación específica, durante un periodo ON. El par velocidad de transmisión-formato de modulación determina el número de FSUs requeridos por una conexión [19]. Durante el periodo OFF, el nodo fuente no envía información. En este artículo, se supone un tráfico uniforme y homogéneo. La duración media del periodo ON (OFF) de cada conexión es denominado por t_{ON} (t_{OFF}). En este sentido, la carga de tráfico ofrecida por cada conexión a la red está dada por:

$$\rho = \frac{t_{ON}}{t_{OFF} + t_{ON}} \quad (1)$$

IV. ALGORITMO RSA CONJUNTO Y ADAPTIVO

En este artículo, se propone un nuevo algoritmo denominado "Dynamic Graph Coloring" (DGC), el cual resuelve el problema RSA de manera conjunta y adaptiva.

Cuando llega una solicitud para establecer una conexión entre un par de nodos (i, j) requiriendo M FSUs, el algoritmo DGC ejecuta los pasos mostrados en el pseudo-código de la Fig. 3.

A modo de ejemplo, se ejecuta el algoritmo DGC suponiendo que la topología de red G es la mostrada en la Fig. 4 ($|\mathcal{N}| = 5$ nodos, $|\mathcal{C}| = 6$ enlaces y $|FSU|_{max} = 5$). En el ejemplo, llega una petición de conexión entre los nodos $i=5$ al $j=3$ de $M=3$ FSUs, cuyo estado de ocupación de FSU's de cada enlace de la red es mostrado en la Fig. 4 (con color azul se representan las FSUs ocupadas, y las disponibles, con blanco).

Los siguientes pasos son ejecutados en la **primera iteración** del algoritmo DGC ($x = 1$):

Paso 1: $x = 1$; $\mathcal{R}_{5,3} = \{\emptyset\}$.

Paso 2: Se construye el sub-grafo $G_1(3)$ (mostrado en la Fig. 5)

Paso 3: Se obtiene $\mathbb{R}_{5,3}[G_1(3)]$, compuesto por la trayectoria a través de los nodos 5-1-2-3.

Paso 4: $\mathcal{R}_{5,3} = \{\mathbb{R}_{5,3}[G_1(3)]\}$.

Paso 5: $x=2$, ir al Paso 2 (inicio de la segunda iteración del algoritmo)

Paso 1: Inicialización de variables

$x = 1$, donde x es un identificador que representa a un FSU en particular de un enlace. Se supone que el primer FSU desde izquierda a derecha es identificado con el número 1.

$\mathcal{R}_{i,j} = \{\phi\}$, donde $\mathcal{R}_{i,j}$ es el conjunto de caminos espectrales entre los nodos (i,j) .

Paso 2: Construir un sub-grafo de \mathcal{G} , denominado por $\mathcal{G}_x(M)$.

El sub-grafo $\mathcal{G}_x(M)$ está compuesto de los enlaces de \mathcal{G} que cumplen con tener M FSU's contiguos disponibles, comenzando desde el FSU con identificador igual a x . Si no es posible construir ese sub-grafo, ir al Paso 5.

Paso 3: Ejecutar el algoritmo Dijkstra en $\mathcal{G}_x(M)$ para encontrar el camino con el menor número de saltos entre el nodo i al j . Este camino espectral es denominado como $\mathbb{R}_{i,j}[\mathcal{G}_x(M)]$.**Paso 4:** Incluir $\mathbb{R}_{i,j}[\mathcal{G}_x(M)]$ al conjunto $\mathcal{R}_{i,j}$.**Paso 5:** Si $x + M - 1 < |FSU|_{max}$ entonces :

- $x = x + 1$
- Ir al Paso 2

Sino:

- Ir al Paso 6 (se han encontrado todos los posibles caminos espectrales)

Paso 6: Si $\mathcal{R}_{i,j} \neq \{\phi\}$, entonces:

- Seleccionar el $\min\{\mathcal{R}_{i,j}\}$ (el camino más corto en $\mathcal{R}_{i,j}$) para establecer la conexión entre i a j .

Sino:

- Rechazar la solicitud de conexión.

Figura 3. Pseudo-código del algoritmo DGC.

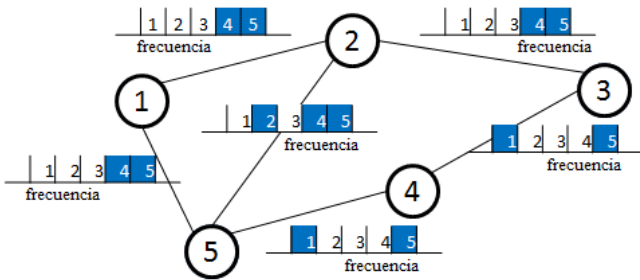
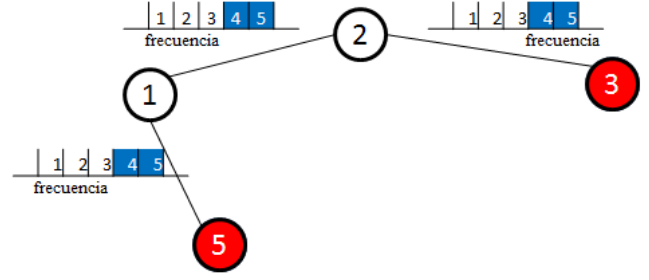


Figura 4. Topología usada para ejemplo de funcionamiento del algoritmo DGC.

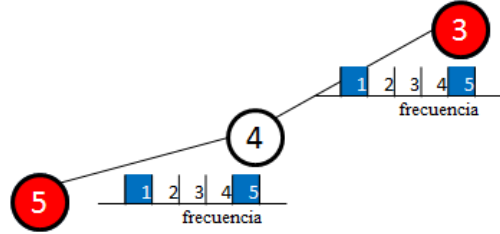
Figura 5. Sub-grafo $\mathcal{G}_1(3)$ **Segunda iteración ($x=2$)**

Step 2: Se construye el sub-grafo $\mathcal{G}_2(3)$ (mostrado en la Fig. 6)

Step 3: Se obtiene $\mathbb{R}_{5,3}[\mathcal{G}_2(3)]$, compuesto por la trayectoria a través de los nodos 5-4-3.

Step 4: $\mathcal{R}_{5,3} = \{\mathbb{R}_{5,3}[\mathcal{G}_1(3)], \mathbb{R}_{5,3}[\mathcal{G}_2(3)]\}$.

Step 5: $x = 3$, ir a Paso 2.

Figura 6. Sub-grafo $\mathcal{G}_2(3)$.**Tercera iteración ($x=3$)**

Paso 2: Ir al Paso 5 (debido a que no es posible construir un sub-grafo con algún enlace que contenga disponible $M=3$ FSU's contiguos, comenzando desde el FSU con identificador igual a 3)

Paso 5: Ir al Paso 6 (dado que $x + M - 1 = 5 = |FSU|_{max} = 5$).

Paso 6: Obtener $\min\{\mathcal{R}_{5,3}\}$, el cual corresponde a $\mathbb{R}_{5,3}[\mathcal{G}_2(3)]$. Es decir, la conexión es establecida asignándoles los FSUs 2, 3 y 4 a través de la ruta 5-4-3.

V. RESULTADOS NUMÉRICOS

El desempeño del algoritmo DGC fue evaluado mediante simulación. Para ello, se programó en C++ un simulador orientado a eventos.

La topología usada para los experimentos de simulación fue la NSFNet (*National Science Foundation's Network*), compuesta de 14 nodos y 21 cables, como se muestra en la Fig. 7. Cada cable se compone de 2 fibras ópticas unidireccionales (una en cada dirección). Se supone que cada enlace tiene un espectro disponible de 1350 GHz, centrado en 193,1 THz (de 1545 nm a 1555 nm). Suponiendo que el ancho de banda por FSU es de 12,5 GHz, en cada enlace hay 108 FSUs.

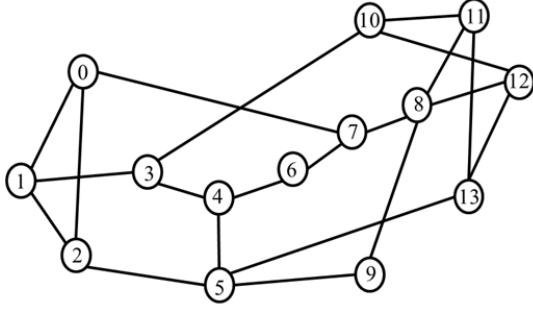


Figura 7: Topología NSFNet

La duración de los periodos ON y OFF de cada conexión se modela según una distribución exponencial. La duración media del periodo ON, denotada por t_{ON} , se estableció en 1 ms. La duración media del periodo OFF se varió, según la Ec. (1), para obtener distintos valores de carga de tráfico (entre 0,1 y 0,9).

Las conexiones pueden requerir (con distribución uniforme) uno de los siguientes valores de tasas de transmisión: 10, 40, 100, 400 y 1000 Gbps. El número de FSUs requerida por cada conexión depende de la tasa de transmisión requerida y del formato de modulación utilizado. En este artículo, se utilizan los valores que se muestran en la Tabla I.

A modo de comparación, el rendimiento de otros 5 algoritmos RSA fue también evaluado. Cuatro de ellos son del tipo R+SA. El problema de ruteo se resuelve usando el algoritmo 3-SP. Esto es, en la posición (i, j) de una tabla de ruteo (i : nodo origen, j : nodo destino) se almacena un conjunto $\Gamma_{i,j} = \{r_{i,j}^1, r_{i,j}^2, r_{i,j}^3\}$ con las 3 rutas más cortas que comunican al nodo i con el nodo j . Al recibir una solicitud de establecimiento de conexión que requiere M FSUs, la primera ruta de este conjunto se ingresa como dato de entrada al algoritmo de asignación de espectro. Si el algoritmo de asignación de espectro retorna exitosamente, se asigna la primera ruta y los FSUs disponibles encontrados por el algoritmo. Si no, se intenta el mismo procedimiento con la segunda ruta y así sucesivamente. Si después de revisar las 3 rutas el algoritmo retorna sin éxito, se rechaza la solicitud de conexión. Cada uno de los 4 algoritmos R+SA evaluados usa un algoritmo de asignación de espectro distinto. Para definirlos formalmente, considere el conjunto $S(r_{i,j}^h) = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ de segmentos de espectro que contienen al menos M FSUs contiguas en cada enlace de la ruta $r_{i,j}^h$. El segmento s_1 es el segmento situado en la posición más a la izquierda del espectro, el segmento s_2 es el segmento ubicado en segundo lugar más cercano a la izquierda del espectro y así sucesivamente. Sea $|s_q|$ el tamaño del segmento q , en número de FSUs. Cada algoritmo SA opera como se describe a continuación.

First Fit (FF) [20]: Se revisa el conjunto $S(r_{i,j}^h)$ de izquierda a derecha y se asigna el primer segmento disponible. Si $S(r_{i,j}^h) = \emptyset$, el algoritmo SA retorna sin éxito.

Random Fit (RF) [20]: Se selecciona aleatoriamente un segmento del conjunto $S(r_{i,j}^h)$. Si $S(r_{i,j}^h) = \emptyset$, el algoritmo SA retorna sin éxito.

Best Fit (BF) [16]: Se selecciona el segmento con el mínimo valor de $(|s_q| - M)$. Si $S(r_{i,j}^h) = \emptyset$, el algoritmo SA retorna sin éxito.

Bit Rate Aware Fit (BRAFF) [16]: Para solicitudes de conexión de baja tasa de transmisión (10, 40 y 100 Gbps) se asigna el primer segmento del conjunto $S(r_{i,j}^h)$, recorriéndolo de izquierda a derecha. Para solicitudes de conexión con alta de transmisión (400 and 1000 Gbps), se asigna el primer segmento del conjunto $S(r_{i,j}^h)$, recorriéndolo de derecha a izquierda. Si $S(r_{i,j}^h) = \emptyset$, el algoritmo SA retorna sin éxito.

TABLA I. NÚMERO DE FSU REQUERIDAS PARA DISTINTAS TASAS DE TRANSMISIÓN.

| Tasa de Transmisión | Ancho espectral requerido [GHz] | Número de FSUs |
|---------------------|---------------------------------|----------------|
| 10 Gbps | 25 | 2 |
| 40 Gbps | 50 | 4 |
| 100 Gbps | 50 | 4 |
| 400 Gbps | 75 | 6 |
| 1 Tbps | 150 | 12 |

Los 4 algoritmos R+SA recién descritos se identifican por las siglas del algoritmo de ruteamiento usado (3SP) y las siglas del algoritmo de asignación de espectro. Es decir, 3SP-FF, 3SP-RF, 3SP-BF and 3SP-BRAFF.

El quinto algoritmo incluido en la comparación opera de la siguiente manera para resolver el problema RSA conjuntamente:

Maximize Path Spectrum Consecutiveness (MPSC) [15]: Al recibir una solicitud de conexión, el algoritmo calcula el impacto de establecer la conexión en k rutas distintas usando el algoritmo FF de asignación de espectro. Dicho impacto se mide en términos del *factor de consecutividad de espectro*. El camino espectral con el factor más alto se selecciona para establecer la conexión. Si no se encuentra ningún conjunto de FSUs contiguas en ninguna ruta, la solicitud se rechaza. En este artículo el algoritmo se evalúa para $k = 3$.

La Fig. 8 muestra la fracción de solicitudes de conexión rechazadas en función de la carga de tráfico para el algoritmo propuesto (DGC) y los 5 algoritmos seleccionados para este estudio.

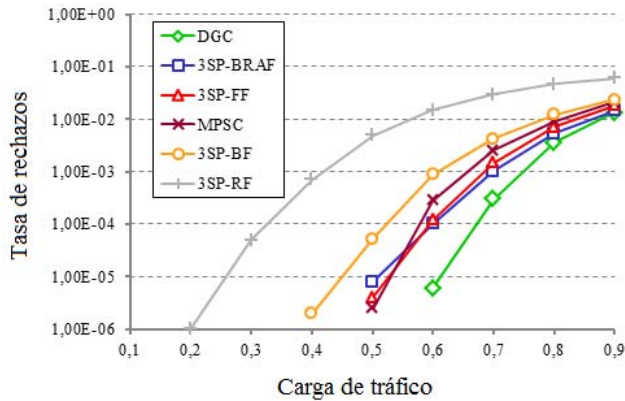


Figura 8. Tasa de rechazos en función de la carga de tráfico para la topología NSFNet.

Es posible observar que DGC obtiene una tasa de rechazos menor que todos los algoritmos estudiados para todo el rango de cargas de tráfico. Esto es debido a su habilidad para encontrar caminos espectrales de manera adaptativa, considerando el estado de la red al procesar una solicitud de establecimiento de conexión.

En segundo lugar se encuentran los algoritmos 3SP-BRAF y 3SP-FF, que intentan disminuir la fragmentación del espectro al asignar FSUs de manera “compacta”. Cabe notar que, a pesar de la mayor complejidad del algoritmo MPSC, no consigue un rendimiento mejor que 3SP-FF, que es computacionalmente más simple.

Finalmente, el peor rendimiento lo obtiene 3SP-RF, el que debido a la asignación aleatoria del espectro lo fragmenta mucho más que los otros algoritmos. El bajo rendimiento de 3SP-RF ya había sido demostrado en el contexto de algoritmos de ruteo y asignación de longitudes de onda en redes ópticas de grilla fija.

Cabe notar que el mejor rendimiento de DGC se obtiene a expensas de una mayor complejidad computacional. Al ejecutar el algoritmo de Dijkstra en cada grafo posible, su complejidad computacional es $O(|FSU|_{max} \cdot |\mathcal{N}|^2)$. En cambio, los algoritmos R+SA exhiben una complejidad computacional de $O(|\mathcal{L}| + |FSU|_{max})$.

Los algoritmos fueron evaluados también en la topología Eurocore, compuesta de 11 nodos y 21 cables, con el mismo desempeño relativo.

VI. CONCLUSIONES

En este artículo se propuso un nuevo algoritmo RSA llamado *Dynamic Graph Coloring* (DGC). El objetivo de DGC es conseguir una baja tasa de rechazos mediante la búsqueda exhaustiva del mejor camino espectral. Para ello, se busca el camino más corto posible (i.e. el camino con el menor número de saltos con el suficiente número de FSUs para establecer la conexión) tomando en cuenta el estado de la red. El desempeño del algoritmo DGC se evaluó mediante simulación y se comparó con el rendimiento de 5 algoritmos propuestos en la literatura. Los resultados de simulación mostraron que el algoritmo DGC obtuvo la menor tasa de

rechazos entre todos los algoritmos evaluados. En algunos casos, en al menos un orden de magnitud.

Nuestro trabajo de investigación futura se enfocará en mejorar las debilidades del algoritmo propuesto:

- diseñar un algoritmo con un rendimiento similar a DGC, pero con menor complejidad computacional;
- considerar el formato de modulación utilizado para determinar el número de FSUs requeridos y el máximo alcance de la señal óptica. Es decir, transformar el algoritmo RSA en un algoritmo RMLSA (RMLSA: *Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment*).
- estudiar el impacto de distribuciones no uniforme para las tasas de transmisión de las solicitudes de conexión.

REFERENCIAS

- [1] E. Lach, W. Idler, "Modulation formats for 100 G and beyond," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 17, no. 5, pp. 377 - 386, August 2011.
- [2] A. Sano, T. Kobayashi, S. Yamanaka, H. Kawakami, Y. Miyamoto, K. Ishihara, M. Masuda, "102,3 Tb/s (224 x 548 Gb/s) C- and Extended L-band All Raman Transmission over 240 km using PDM-64QAM Single Carrier FDM with Digital Pilot Tone," in *Proc. of OFC/NFOEC*, Los Angeles, CA, USA, 2012.
- [3] A. Mayoral, O. Gonzalez de Dios, V. Lopez, J.P. Fernandez-Palacios, "Migration Steps Towards Flexi-grid Networks," in *Future Network & Mobile Summit 2013*, Lisboa, Portugal, 2013.
- [4] A. M. Saleh, J. M. Simmons, "Technology and Architecture to Enable the Explosive Growth of the Internet," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 1, pp. 126 - 132, January 2011.
- [5] I. Tomkos, M. Angelou, R. J. Durán, I. de Miguel, R. M. Lorenzo, D. Siracusa, E. Salvadori, A. Tymecki, Y. Ye, I. Tafur, "Next Generation Flexible and Cognitive Heterogeneous Optical Networks," *The Future Internet, Lecture Notes in Computer Science*, pp. 225 - 236, 2012.
- [6] I. Tomkos, E. Palkopoulou, M. Angelou, "A survey of recent developments on flexible/elastic optical networking," in *International Conference on Transparent Optical Networks*, Coventry, UK, 2012.
- [7] H. Takara, B. Kozicki, Y. Sone, T. Tanaka, A. Watanabe, A. Hirano, K. Yonenaga, M. Jinno, "Distance-Adaptive Super-Wavelength Routing in Elastic Optical Path Network (SLICE) with Optical OFDM," in *European Conference and Exhibition on Optical Communication*, Torino, Italy, 2010.
- [8] 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, no. 11, pp. 1 - 9, Nov 2009.
- [9] I. Kaminov, T. Li, A. E. Willner, *Optical Fiber Telecommunications: Components and Sub-Systems*, 6th ed.: Academic Press, 2013, vol. VIA.
- [10] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, S.J.B. Yoo, "Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 2, pp. s12 - s20, Feb. 2012.
- [11] T. Morioka, M. Jinno, H. Takara, H. Kubota, "Innovative Future Optical Transport Network Technologies," *Feature Articles: Ultrahigh-speed Ultrahigh-capacity Optical Transport Network*, vol. 9, no. 8, August 2011.
- [12] L. Velasco, A. Castro, M. Ruiz, and G. Junyent, "Solving Routing and Spectrum Allocation Related Optimization Problems: from Off-Line to In-Operation Flexgrid Network Planning," *Journal Lightwave Technology*, article in press, April 2014.
- [13] M. Jinno, H. Takara, Y. Sone, K. Yonenaga, A. Hirano, "Multiflow optical transponder for efficient multilayer optical networking,"

IEEE Communications Magazine, vol. 50, no. 5, pp. 56 - 65, May 2012.

- [14] M. Jinno, H. Takara, Y. Sone, K. Yonenaga, A. Hirano, "Elastic optical path network architecture: Framework for spectrally-efficient and scalable future optical networks," *IEICE Transactions on Communications*, vol. 95, no. 3, 2012.
- [15] Y. Wang, J. Zhang, Y. Zhao, J. Liu, W. Gu, "Spectrum consecutiveness based routing and spectrum allocation in flexible bandwidth networks," *Chinese Optics Letters*, vol. S10606, no. 10, pp. 1 - 4, June 2012.
- [16] R. Ahumada, A. Leiva, F. Alonso, S. Fingerhuth, G. Fariás, "Spectrum Allocation Algorithms for Elastic DWDM Networks on Dynamic Operation," *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 12, n° 6, September 2014.
- [17] N. Patel, N. Ji, J. P. Jue, T. Wang, "Routing, wavelength assignment, and spectrum allocation algorithms in transparent flexible optical WDM networks," *Optical Switching and Networking*, vol. 9, no. 3, pp. 191-204, February 2012.
- [18] A. Zapata-Beghelli, P. Bayvel, "Dynamic Versus Static Wavelength-Routed Optical Networks", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 26, n° 20, pp. 3403-3415, 2008.
- [19] N. Sambo, P. Castoldi, F. Cugini, G. Bottari, P. Iovanna, "Toward high-rate and flexible optical networks", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 50, n° 5, pp. 66-72, 2012.
- [20] J. Zhang, J. Wang, W. Gu, Y. Zhao, "PCE-based routing and spectrum assignment in OFDM-based bandwidth-variable optical networks," *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, vol. 19, no. 2, pp. 116 - 122, April 2012.



A. Leiva recibió el título de Ingeniero Civil Electrónico y el grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Eléctrica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), Valparaíso, Chile, en 2003 y 2008, respectivamente. Obtuvo el grado de Doctor en Ingeniería Electrónica en la Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso (UTFSM), Chile, en 2013. Desde el año 2012, es Profesor Asociado en la Escuela de Ingeniería Eléctrica en la PUCV.



N. Pavez recibió el título de Ingeniero Civil Electrónico y el grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Eléctrica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), Valparaíso, Chile, en el año 2015. Sus temas de investigación están relacionados con tópicos de asignación de recursos en redes ópticas flexibles.



A. Beghelli recibió el título de Ingeniero Civil Electrónico y el grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Electrónica en la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), Valparaíso, Chile, en 1993 y 2001, respectivamente; y el grado de Ph.D en Ingeniería Electrónica en University College London (UCL), UK, en 2006. Actualmente, Dra. Beghelli es académica en la Universidad Adolfo Ibáñez, Chile, e investigadora honoraria en UCL, UK..



R. Olivares recibió el título de Ingeniero Civil Electrónico de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), Valparaíso, Chile, en 1989; y los grados de Magíster y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica de la Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil, en 1994 y 2000, respectivamente. Desde 1986 el Dr. Olivares es académico de jornada completa en el Departamento de Electrónica de la UTFSM.