

Multicast Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment in Elastic Optical Networks – A Genetic Algorithm-based Approach

Carlos A. Vera y Aragón Villamayor, Jonathan E. Funes
Maria E. Vazquez, Carlos Mendez, Diego P. Pinto-Roa

Facultad Politécnica
Universidad Nacional de Asunción
San Lorenzo, Paraguay

{karlosaragon32,funespy}@fpuna.edu.py, mariaelena.vazquez@gmail.com, {cmendez, dpinto}@pol.una.py

Abstract—The problem of multicast routing, modulation level, and spectrum assignment is essential for the efficient performance of elastic optical networks. This problem seeks to compute light forests with the least optical network resources to satisfy multicast requests. The proposed strategies in the literature addressed this problem with exact or heuristic techniques, which are suitable when the number of requests is low. Developing scalable and efficient strategies is critical when the problem is complex, therefore, this study proposes a metaheuristic approach based on genetic algorithms. Given a set of multicast requests and a network topology, the proposed approach seeks to compute a set of light forests that minimizes (1) the number of blocked requests, (2) the maximum used frequency slot, and (3) the number of used transponders. Numerical simulations were performed to study the proposed algorithm performance under different static traffic loads and network topologies. The experimental results show that the proposed algorithm is promising for obtaining competitive solutions in reasonable computational time compared to the competitive heuristic approaches of state-of-the-art.

Index Terms—Multicast Routing, Modulation Level, Spectrum Assignment, Elastic Optical Networks, Genetic Algorithms.

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento continuo del volumen de tráfico requerido por las videoconferencias, computación en la nube, entre otras aplicaciones propicia el desarrollo de las redes ópticas elásticas (*Elastic Optical Networks* - EON). La tecnología EON apunta como la opción más prometedora para una utilización más eficiente del espectro óptico al admitir granularidad de sub y super longitud de onda flexible [1].

No obstante, las bondades de EON vienen asociadas con desafíos imponiendo restricciones de capa óptica como [2]: (i) continuidad, (ii) contigüidad, y (iii) no solapamiento de espectro asignados a las peticiones. Estas restricciones impactan mayormente en el uso eficiente de EON cuando se consideran tráficos multi-difusión en comparación al tradicional tráfico uni-difusión.

Dada la complejidad de la multi-difusión en EON, los principales trabajos han estudiado el problema de enrutamiento en multi-difusión y asignación de nivel de modulación y espectro (*Multicast, Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment* - MRMLSA) con enfoques basado en programación lineal entera (*Linear Integer Programming* - ILP) y

heurísticas como el árbol de camino más corto de primer ajuste (*Shortest Path Tree-First Fit* - SPT-FF) y el árbol de expansión mínima (*Minimal Spanning Tree* - MST-FF) [3]. Estas heurísticas muestran una menor probabilidad de bloqueo para tráfico dinámico en EON en comparación con las redes de multiplexación por división de longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexing* - WDM) [4] pero a costa de un mayor número de transpondedores. Por otra parte, los ILP son aplicados en el contexto de planificación siendo estos enfoques no escalables cuando el número de solicitudes aumenta [5], [6]. El MRMLSA generaliza otros problemas de menor complejidad como el enrutamiento y asignación de espectro (*Routing and Spectrum Assignment* - RSA) que es un problema NP-completo [6].

En consecuencia, este trabajo propone un enfoque meta-heurístico basado en Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithms* - GA) que se caracteriza por calcular soluciones de buena calidad en un tiempo razonable en problemas de alta complejidad [7]. En este sentido la contribución principal de este trabajo es la aplicación de la técnica GA para el problema MRMLSA buscando minimizar el número peticiones bloqueadas, el número de transpondedores y el índice máximo de espectro utilizado considerando un enfoque multi-difusión basado en bosque.

Este trabajo se organiza de la siguiente forma: la Sección II presenta el planteamiento del problema mientras que la Sección III expone los trabajos relacionados; la Sección IV presenta la propuesta de solución, mientras que las simulaciones y análisis de resultados son dados en la Sección V. Finalmente, las conclusiones y trabajos futuros son dados en la Sección VI.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Esta sección presenta el problema MRMLSA de forma progresiva a través de las siguientes partes: primero se introduce la tecnología EON, posteriormente el problema básico RSA; luego, el enrutamiento y asignación de nivel de modulación y espectro (*Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment* - RMLSA), y finalmente, se plantea el caso más general la multi-difusión RMLSA (MRMLSA).

A. Redes Ópticas Elásticas

La creciente demanda de Internet requiere una infraestructura escalable y eficiente en costo [8]. EON es una tecnología que dota a las redes de comunicación con capacidad de asignación de espectro a los caminos ópticos de acuerdo a los requerimientos de ancho de banda de los clientes [9]. EON divide el espectro de la fibra óptica en porciones pequeñas de tamaño constante llamadas ranuras de frecuencia (*Frequency Slots - FS*) [10] como se puede observar en la Figura 1.

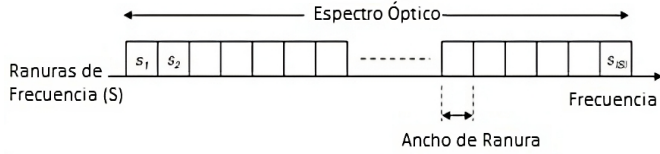


Figura 1: Espectro óptico dividido en ranuras de frecuencia.

EON tiene capacidad de adaptarse a los requerimientos de tráfico mediante una rejilla de espectro flexible (*flex-grid*). Esta rejilla tiene la capacidad de un ancho espectral variable por canal según la demanda de ancho de banda. Esta rejilla permite una separación espectral flexible entre canales, que ayuda a optimizar la eficiencia en el uso del espectro. En EON las ranuras de frecuencia (o simplemente ranuras) pueden tener un tamaño fijo (6,25; 12,5; 25; y 50 GHz) [11].

Una de las cuestiones claves en el diseño, planificación y operación de EON está dirigida al problema RSA. Una solución RSA de alta calidad conduce a una utilización más eficiente del espectro óptico. Teniendo en cuenta las restricciones de capa óptica ya mencionadas, el cálculo de una solución RSA eficiente es una tarea indispensable y desafiante para el uso de EON.

B. Enrutamiento y Asignación de Espectro

En el problema RSA se busca establecer caminos ópticos (*light-path*) para cada petición de tipo uni-difusión seleccionando una ruta apropiada y asignando el número de ranuras requerido satisfaciendo las siguientes restricciones de capa óptica [12], [13]:

- La continuidad del espectro: define que las ranuras asignadas deben ser los mismos en toda la ruta del tráfico dado que no se dispone de capacidad de conversión de espectro.
- La restricción de no superposición: define que las ranuras asignadas a un tráfico no deben ser asignados a otro tráfico en la misma ruta.
- La contigüidad del espectro: define que de todas las ranuras pertenecientes a un mismo tráfico debe ser adyacentes.

El problema RSA es considerado como el problema central en EON dado que otros problemas son variaciones de la misma.

C. Asignación del Esquema de Modulación

El problema RSA asume que el canal óptico carece de imperfecciones y en consecuencia utiliza un único esquema

de modulación, además asume que la distancia de la ruta no tiene límite. No obstante, las imperfecciones de la fibra óptica limitan la distancia efectiva de un canal óptico [5]. Esta limitación se puede mitigar con esquemas de modulación que reducen el número de bits por baudio transmitido. Sin embargo, al reducir la tasa de baudios será necesario aumentar el número de ranuras para satisfacer la petición de ancho de banda. En consecuencia, esta política implica una relación de compromiso entre lograr mayor distancia de alcance y subutilizar la capacidad de una ranura.

Si el problema de ruteo óptico en EON considera también la asignación de esquemas de modulación el problema se denomina enrutamiento y asignación de nivel de modulación y de espectro (*Routing, Modulation Level, and Spectrum Assignment - RMLSA*) [2]. La Figura 2 presenta un ejemplo de los conceptos mencionados tomado de [7] y [14]. En la Figura 2.a presenta una topología EON donde se observan en los enlaces las distancias en kilómetros. Las Figuras 2.b y 2.c muestran un conjunto de modulaciones y alcance de transmisión respectivamente. El conjunto de modulaciones considerados son 16 y 8 QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) y BPSK (*Binary Phase Shift Keying*). La Figura 2.d presenta la tabla de peticiones uni-difusión r_1 , r_2 y r_3 . Cada petición está conformado por un nodo fuente s , un nodo destino d y un ancho de banda BW Gbps requerido. La longitud de la ruta se puede observar en la columna longitud de la trayectoria, mientras que el esquema de modulación y nivel de modulación se observan en las columnas *Mod* y *R*, respectivamente. El número de ranuras calculado por petición se presenta en la columna *FS*. Como se puede observar, la distancia de la ruta para r_1 es de 700 km por lo que el esquema de modulación más óptimo es QPSK con un eficiencia de $R=2$ bits por símbolo. Dado que el ancho de banda solicitado es de $BW=50$ Gbps, el número de ranuras se puede calcular de la siguiente forma [2]:

$$FS = \left\lceil \frac{BW}{C \cdot R} \right\rceil \quad (1)$$

donde $C=12,5$ Gbps es el ancho de banda de una ranura con el nivel de modulación base BPSK para éste ejemplo. Note que en el problema RSA solo se utiliza el nivel de modulación base.

En la Figura 2.e podemos observar la asignación de espectro de las tres peticiones cumpliendo las tres restricciones de capa óptica con una ranura como banda de guarda.

D. Enrutamiento Multi-difusión y Asignación de Nivel de Modulación y de Espectro

El problema RMLSA básico considera solo peticiones del tipo uni-difusión. En escenarios de tráfico multi-difusión se introduce la complejidad de calcular una ruta por cada destino. Como fue mencionado, el RMLSA con múltiples destinos se denomina el problema enrutamiento multi-difusión y asignación de nivel de modulación y de espectro (*Multicast, Routing, Modulation Level and Spectrum Assignment - MRMLSA*) [15].

Dependiendo de la estrategia de enrutamiento y asignación de espectro se pueden considerar multi-difusión basado en

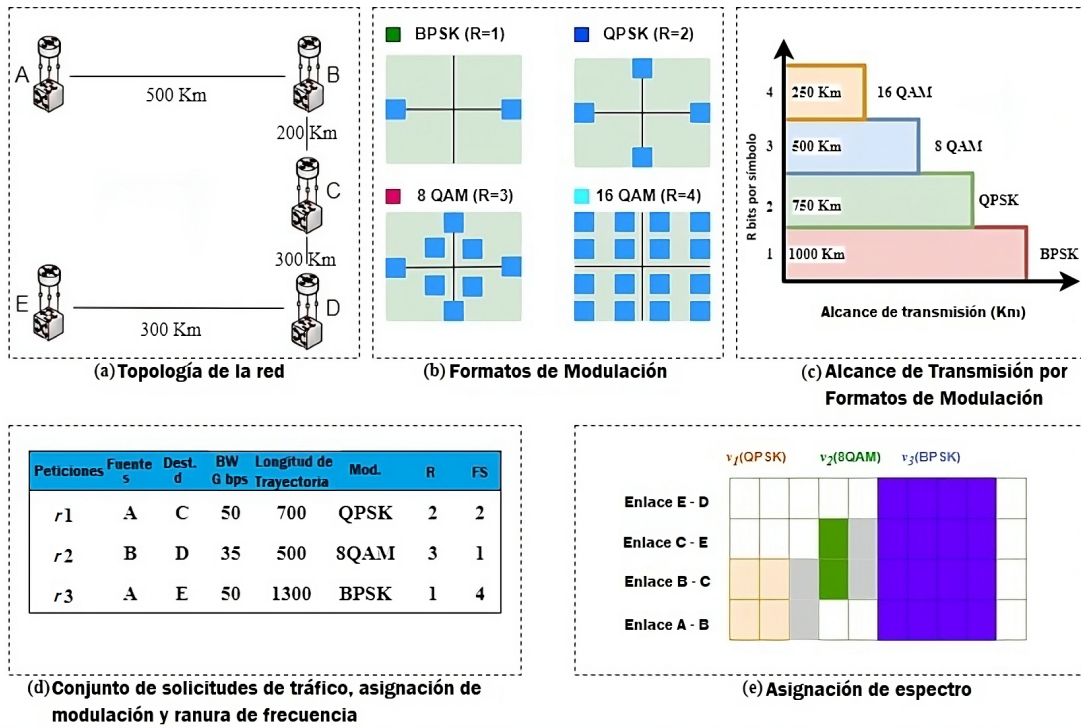


Figura 2: Ejemplo de RMLSA basado en [7] y [14].

múltiples caminos ópticos (*light-paths*) [16], un solo árbol óptico (*light-tree*) [16], o múltiples sub-arboles también conocido como bosque óptico (*light-forest*) [17]. En la primera estrategia el problema MRMLSA se reduce a múltiples RMLSA, esto es, la petición multi-difusión se divide en múltiples peticiones uni-difusión independientes como se observa en la Figura 3.a. Sin embargo, esta estrategia utiliza ineficientemente las ranuras cuando las rutas comparten una fibra óptica. Esto se puede observar en el enlace A-B de la Figura 3.a.

El árbol óptico logra mitigar el uso ineficiente de los recursos observado en el MRMLSA basado en simples caminos ópticos. El árbol evita el uso de múltiples canales en una misma fibra óptica como se observa en la Figura 3.b. No obstante, esta mejora se logra al introducir dispositivos especializados y costosos que logran bifurcar la luz que entra a un nodo en múltiples salidas denominados *Multicast Capable Optical Cross Connect* (MC-OXC) [4]. Un MC-OXC es un OXC con *splitter* ópticos. Debido a la restricción de continuidad, el espectro y esquema de modulación asignada al árbol es única. Esta restricción impacta en árboles con uso del espectro ineficiente cuando la distancia de origen a destinos presenta mucha varianza. Esto es, asigna un esquema de modulación que satisface a la sub-ruta más larga pero ineficiente para la ruta más corta.

El bosque óptico relaja la restricción de utilizar un solo nivel de modulación como se observa en la Figura 3.c. Cada sub-árbol del bosque se puede construir de forma a asignar el nivel de modulación y ranuras de forma eficiente. Cada sub-árbol conecta el origen con un sub-conjunto de nodos destinos [17]. Este enfoque trae consigo algunos desafíos. En primer lugar construir los sub-arboles es computacionalmente más complejo que construir un solo árbol por petición. Por

otra parte, cada sub-árbol utiliza un transpondedor de ancho de banda variable (*Bandwidth Variable Transponder* - BVT) independiente, lo que conlleva a un problema de aumento de recursos físicos.

III. TRABAJOS RELACIONADOS

Esta sección presenta una clasificación de los distintos enfoques MRMLSA propuestos en la literatura. Esta clasificación complementa a las estrategias presentadas en la Figura 3.

Una primera clasificación del problema MRMLSA es considerar la dinámica del tráfico: *on-line*, *semi on-line* y *off-line*. Los enfoques MRMLSA *on-line* se centran principalmente en el problema de la desfragmentación del espectro y bloqueo de solicitudes [18]. Típicamente en este tipo de escenarios las solicitudes son atendidas al momento de llegar. Esta línea de investigación queda fuera del alcance del presente trabajo. Por otro lado, en MRMLSA *semi on-line* y *off-line* es posible aplicar técnicas de optimización. En particular, consideramos tráfico *semi on-line* cuando las peticiones son atendidas a intervalos de tiempos que permitan realizar cálculos de optimización. En este trabajo nos centramos en estos grupos los cuales se pueden volver a dividir en Modelos de Programación Matemática [14], Heurísticas y Meta-heurísticas [7].

Acorde a lo analizado se ha encontrado que los trabajos pueden ser también clasificados según: el enfoque de optimización, el tipo de enrutamiento, el tipo de división de tráfico, el tipo de esquema utilizado, así como también el tipo de división del conjunto de peticiones a ser procesados. Estos conceptos son explicados a continuación:

- 1) Organización de las peticiones: en esta categoría encontramos dos enfoques:

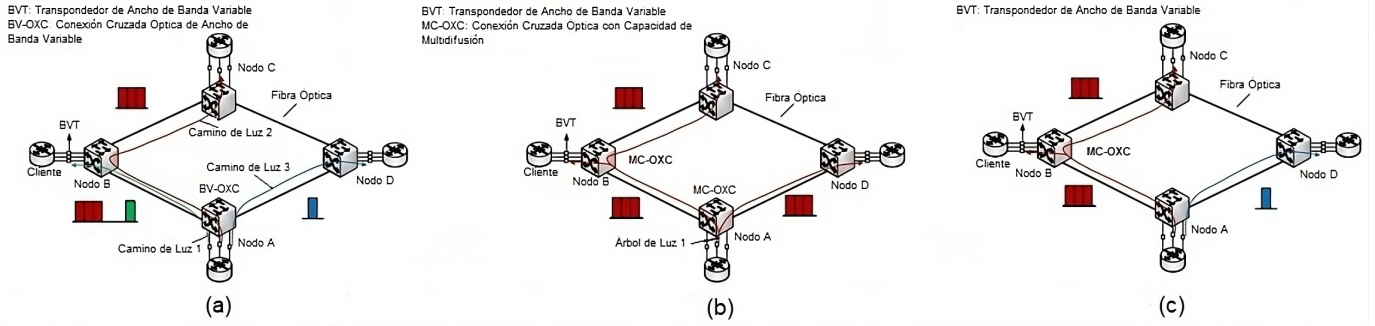


Figura 3: Estrategias de multi-difusión: (a) *light-path*, (b) *light-tree*, y (c) *light-forest*.

- Un solo conjunto: en este enfoque los algoritmos calculan una única solución tomando todas las peticiones simultáneamente [5].
 - Múltiples conjuntos: en este enfoque el conjunto de peticiones son inicialmente divididos en sub-conjuntos; posteriormente, se solicita a un algoritmo que calcule la solución para el primer sub-conjunto, luego para el siguiente y así sucesivamente [5].
- 2) Enfoques de enrutamiento: los enfoques de enrutamiento se presentan en tres esquemas bien diferenciados:
- Enrutamiento orientado a enlace: los algoritmos de enrutamiento calculan las soluciones considerando todos los enlaces como potenciales candidatos [19].
 - Enrutamiento orientado a camino: en este caso primeramente se calcula para cada par origen-destino, un conjunto de caminos candidatos, luego el algoritmo de enrutamiento calcula la solución considerando dicho conjunto de caminos [8].
 - Enrutamiento orientado a árbol: similar al caso anterior en este enfoque se debe calcular un conjunto de árboles candidatos para cada petición, posteriormente, el algoritmo de enrutamiento calcula la solución considerando los conjuntos candidatos [20].
- 3) Divisibilidad de tráfico: el flujo de tráfico puede ser dividido en sub-flujos en los nodos orígenes y de vuelta unidas en los destinos, en consecuencia los siguientes tipos de división pueden darse:
- Flujo no dividido: en este sub-enfoque cada demanda se considera un único flujo de tráfico a ser transmitido desde el origen hasta los destinos. Es el que generalmente se utiliza en la literatura [8], [19], [21].
 - Flujo dividido: este caso permite dividir el flujo original en sub-flujos, permitiendo que cada sub-flujo pueda ser tratado de manera independiente y en consecuencia el uso de BVT independientes [22].
- 4) Topología de la solución: En esta clasificación la estructura de solución puede ser del tipo múltiples caminos u orientado a un solo camino, un solo árbol o múltiples arboles u bosque:
- Caminos: esta estructura supone que los nodos no tienen capacidad de dividir la luz, por tanto, solo se admiten un camino por cada par origen-destino,

- esto es, multi-difusión basada en uni-difusión [23].
- Árbol: cuando los nodos tienen capacidad de dividir la luz entonces se admiten estructura tipo árbol en la que un nodo intermedio puede transmitir a todos los destinos el flujo de tráfico por distintos caminos [16].
 - Bosque: cuando la EON admite múltiples modulaciones y la utilización de múltiples BVT por petición entonces es posible la utilización de múltiples sub-arboles denominados bosque [17].

La Tabla I presenta un resumen de la clasificación de los trabajos acorde a las características explicadas. En esta tabla se pueden observar las posibles clasificaciones y esquemas mencionados anteriormente.

Cabe destacar que la propuesta desarrollada en este trabajo es un enfoque orientado a optimización de peticiones conjuntas, enrutamiento orientado a enlaces y flujo de tráfico no dividido. Otro aspecto relevante es que este trabajo propone la utilización de técnicas de optimización evolutivas en comparación al estado del arte que resuelve el problema MRMLSA con ILP o heurísticas. Los ILP no son escalables computacionalmente, mientras que las heurísticas calculan soluciones sub-óptimas cuando la complejidad del problema crece.

IV. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

En esta sección presentamos la propuesta de solución al problema MRMLSA basado GA denominado GA-MRMLSA, la cual es la encargada de guiar el proceso de búsqueda de la mejor solución. Cada individuo GA-MRMLSA representa la secuencia de las peticiones multi-difusión a ser atendida en el sistema, esto es, GA basado en permutaciones [7]. Para cada petición se calcula un bosque multi-difusión mediante las heurísticas de agrupación por tasa de enlaces compartidos (*Link-sharing ratio grouping* - LRG) o agrupación por tasa de enlaces compartidos consistente del uso de espectro (*Spectrum-aware link-sharing ratio grouping* - SA-LRG) propuestas por Fan et al. [56]. La Figura 4 muestra la interacción entre el GA y las heurísticas LRG o SA-LRG para cálculo de una solución MRMLSA.

En las siguientes sub-secciones se explican el GA desarrollado como también el funcionamiento de LRG y SA-LRG.

Tabla I: Clasificación de enfoques MRMLSA.

Org. de Peticiones	Enrutamiento orientado a enlaces		Enrutamiento orientado a caminos pre-calculados		Enrutamiento orientado a arboles pre-calculados		Topología
	Flujo Dividido	Flujo No Dividido	Flujo Dividido	Flujo No Dividido	Flujo Dividido	Flujo No Dividido	
Un solo conjunto	–	[24]	–	[25]	–	–	Caminos
Múltiple sub-conjuntos	[26], [27]	[28], [29]	[30]–[32]	[33]	[32], [34]	[33]	
Un solo conjunto	–	[24]	–	[25]	[35]–[37]	–	Árbol
Múltiple sub-conjuntos	[1], [26], [27], [38]	[28], [39], [40]	[30], [31], [41]–[44]	[33]	[17], [34]–[37], [41], [42], [45]–[54]	[16], [33]	
Un solo conjunto	–	[24]	–	–	–	–	Bosque
Múltiple sub-conjuntos	[26], [27], [55]	[28], [39]	[31]	[33]	–	[33]	

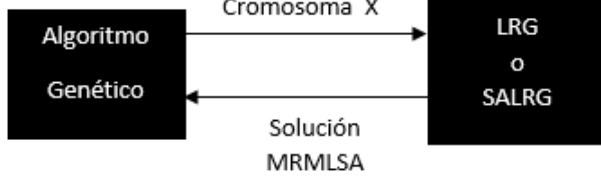


Figura 4: Interacción entre GA y LRG o SA-LRG.

A. Algoritmos Genéticos

Los GA son técnicas computacionales evolutivas que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización [57]. Los GA están basados en el proceso genético de los organismos vivos y pertenecen a la familia de Algoritmos Evolutivos [58]. Estas técnicas se basan en los mecanismos de selección que utiliza la naturaleza, de acuerdo a los cuales los individuos que mejor se adaptan a los cambios ambientales son los que tienden a predominar en la población a largo plazo.

Los cambios se efectúan en los genes de un individuo (unidad básica de codificación de cada uno de los atributos de un ser vivo), y sus atributos más deseables (i.e., los que le permiten adaptarse mejor a su entorno) se transmiten a sus descendientes cuando éste se reproduce [59].

Un GA comienza con un conjunto de individuos generados aleatoriamente, llamada población inicial. Los estados se representan mediante una cadena sobre un alfabeto finito. Dicha codificación define el tamaño del espacio de búsqueda y el tipo de operadores de combinación necesarios para generar la siguiente población evolutiva. Cada elemento del individuo es denominado gen. El vector de genes codifica una solución candidata y se denomina cromosoma [58].

Los GA hacen uso de funciones de aptitud o *fitness* que miden la calidad del individuo asignándole un valor numérico. Una función de *fitness* debería devolver valores más altos para los mejores individuos. Los GA se basan en la afirmación de que combinando buenos individuos se obtienen mejores descendientes. En este contexto, los individuos descendientes son generados mediante la selección de individuos progenitores sobre los cuales se aplica el operador de cruzamiento. No obstante esta afirmación es parcial por lo que el proceso evolutivo necesita de operadores que ayuden a escapar de los óptimos locales en problemas multi-modales. En este sentido, la operación de mutación inyecta información genética aleatoria a los individuos de forma a ayudar a evitar el estancamiento prematuro del proceso evolutivo [60].

B. Algoritmo Genético propuesto para MRMLSA

El GA implementado en este trabajo es un GA generacional elitista [58] presentado en el Algoritmo 1.

Algoritmo 1: GA-MRMLSA

Entrada: Conjunto de Peticiones N , Grafo de red G , Tamaño de la Población cp , Tamaño del Elitismo ce , Numero de Generaciones cg , Probabilidad de Mutación p_m

Salida: Mejor individuo MRMLSA

```

1  $i \leftarrow 0$ ;
2  $P_i \leftarrow$  Inicializar población con  $cp$  individuos;
3 para  $P_i[j]$  hacer
4    $P_i[j].fitness \leftarrow$  Calcular  $fitness(P_i[j], G, N)$ ;
5 fin
6  $Best\_global \leftarrow$  Copiar mejor individuo de  $P_i$ ;
  // Evolución de la población
7  $k \leftarrow 0$ ;
8 mientras  $i < cg$  o  $k < cc$  hacer
9    $cd \leftarrow 0$ ;
10   $P_{new} \leftarrow \emptyset$ ;
11   $P_{new} \leftarrow$  Copiar  $ce$  mejores individuo de  $P_i$ ;
12  mientras  $cd < cp - ce$  hacer
13     $(P_i[a], P_i[b]) \leftarrow$  Seleccionar dos individuos padres de  $P_i$ ;
14     $x \leftarrow$  Cruzamiento de individuos padres  $P_i[a]$  y  $P_i[b]$ ;
15     $y \leftarrow$  Mutación de individuo  $x$  con tasa  $p_s$ ;
16     $y_{fitness} \leftarrow$  Calcular  $fitness(y, G, N)$ ;
17     $P_{new} \leftarrow P_{new} \cup y$ ;
18     $cd \leftarrow cd + 1$ ;
19  fin
20   $Best\_iteration \leftarrow$  Copiar mejor individuo de  $P_i$ ;
  // Reemplazar Población
21   $i = i + 1$ ;
22   $P_i = P_{new}$ ;
  // Verificar la convergencia
23  si  $Best\_iteration$  es mejor que  $Best\_global$  entonces
24     $Best\_global \leftarrow Best\_iteration$ ;
25     $k \leftarrow 0$ ;
26  fin
27  en otro caso
28     $k \leftarrow k + 1$ ;
29  fin
30 fin
31 Retornar Mejor individuo  $Best\_global$ ;
  
```

El algoritmo recibe como datos de entrada un conjunto de peticiones multi-difusión N , un grafo de red G que representa a la EON, y los parámetros evolutivos que determinan el tamaño de la población cp , el tamaño del elitismo ce , el número de generaciones evolutivas cg , el número de iteraciones de convergencia cc , y la probabilidad de mutación p_m . El algoritmo genera aleatoriamente una población inicial P_0 con cg individuos en la línea 2 (Algoritmo 1). En las líneas 3 a 5, se procede al cálculo del *fitness* para cada individuo de la población inicial. Utilizando los parámetros del grafo de red G y el conjunto de peticiones N , desde la línea 8 a 30 se realiza el proceso evolutivo hasta que el número máximo de generaciones cg o el número de convergencia cc sean alcanzados. En las líneas 10 y 11 se realiza el proceso elitista del GA, inicializando la nueva población P_{new} con los ce mejores individuos de la población actual P_i . El proceso de generar los $cp - ce$ individuos evolucionados se realiza desde las líneas 12 a 19 cuyos paso generales son los siguientes:

- Selección: Se selecciona dos individuos reproductores $P_i[a]$ y $P_i[b]$ de P_i (línea 13),
- Cruzamiento: Se cruzan los individuos $P_i[a]$ y $P_i[b]$ para

- generar un nuevo individuo x (línea 14),
- Mutación: Se muta el individuo x con tasa p_s para generar el individuo descendiente y (línea 15),
- Evaluación: Finalmente, se calcula el valor de *fitness* de y (línea 16).

El nuevo individuo y se adhiere a la nueva población P_{new} en la línea 17. En la línea 22 se procede a reemplazar la Población actual P_i por la nueva Población P_{new} . En las líneas 23 a 29 se procesa a capturar el mejor individuo global y determinar la convergencia. Finalmente, en la línea 31 se retorna el mejor individuo calculado en la última población evolutiva.

C. Representación del cromosoma

En este trabajo un individuo se representa mediante el cromosoma que es un vector de números enteros donde el i -ésimo gen indica la i -ésima petición que será atendida, es decir el cromosoma codifica una permutación. El genotipo es un valor numérico entero en el rango de 1 a $|N|$, siendo $|N|$ el número de peticiones. Dada las características de la permutación, el valor numérico del i -ésimo gen debe ser distinto del j -ésimo gen para que la solución sea coherente.

En la Figura 5 se presenta un ejemplo de cromosoma y su relación con la tabla de peticiones multi-difusión. El primer gen del cromosoma indica que la petición r_1 será la primera en ser atendida, el segundo gen indica que la petición r_5 será la segunda en ser atendida, mientras que el tercer gen indica que la petición r_8 será la tercera en ser atendida, y así sucesivamente.

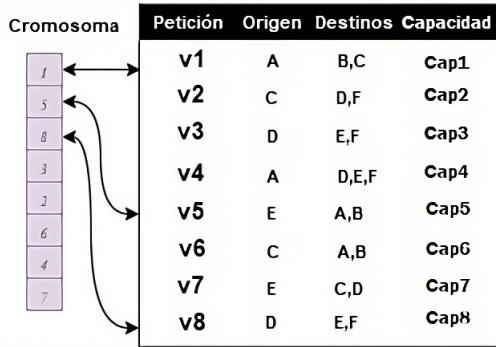


Figura 5: Cromosoma codificando Permutación de Peticiones

D. Inicialización de la población

La población inicial del GA-MRMLSA debe ser la más diversa posible de forma a que el proceso evolutivo tienda a explorar la mayor región de soluciones factibles. Esta exploración ayudará a que el algoritmo converja a una región prometedora que posiblemente contenga a la mejor solución factible [57]. En este trabajo se considera como primer individuo de la primera población a un cromosoma con representación identidad, esto es, $P_0[0] = [1, 2, \dots, |N|]$. Los siguientes individuos $P_0[1], P_0[2], \dots, P_0[cp]$ son generados a partir del primero $P_0[0]$ mediante intercambios entre posiciones de forma a mantener una permutación válida. Para cada i -ésimo gen se toma aleatoriamente con distribución uniforme un j -ésimo gen distinto sobre los cuales se realiza el intercambio.

E. Operadores Evolutivos

La generación de nuevas soluciones o individuos se logra mediante el proceso evolutivo. Este proceso evolutivo genera una nueva población de individuos a partir de la población actual. Como ya fue mencionado, dado que la estrategia evolutiva es elitista, los ce mejores individuos de la población actual sobreviven a la siguiente población (línea 11 del Algoritmo 1) y los $cp-ce$ son generados mediante el proceso evolutivo (líneas 12 a 19). La generación de los $cp-ce$ individuos evolucionados se logra mediante tres operadores evolutivos: selección, cruzamiento y mutación [57], [61]. La operación de selección tiende a seleccionar los individuos más aptos para la reproducción. Los individuos seleccionados transmiten su información genética al nuevo individuo, este concepto se conoce como explotación del conocimiento. Para evitar el estancamiento prematuro por la excesiva explotación del conocimiento, es necesario inyectar información genética nueva que no se encuentra en la población actual. Esta nueva información se inyecta mediante mutaciones, este concepto se denomina como exploración de nuevo conocimiento.

Operador de Selección. La selección de un individuo padre se realiza mediante el esquema de torneo binario sin remplazo [62]. Este esquema selecciona al azar dos individuos de la población, posteriormente el mejor de ambos individuos se retorna como padre. El mismo proceso se aplica para el segundo padre. Cabe mencionar que cada individuo tiene la misma probabilidad de ser seleccionado para competir en el torneo, de esta forma existe la chance de que un individuo con baja calidad pueda ser seleccionado como padre y transmita su información genética al siguiente paso evolutivo.

En este trabajo se considera la calidad de un individuo con tres criterios: número de peticiones bloqueadas, índice máximo de espectro utilizado, y número de BVT. En ese contexto, la comparación de dos individuos para determinar quien es mejor se realiza por orden lexicográfico considerando el siguiente orden de prioridades: número de peticiones bloqueadas, índice máximo de espectro utilizado, y número de BVT utilizados.

Operador de cruzamiento. Los nuevos individuos se generan a partir de dos individuos padres. El operador de cruzamiento se encarga de mezclar las características de ambos padres para generar una descendencia que tenga características heredadas de ambos. El método de cruce utilizado es el *Order Crossover* [63]. Este método recorre los dos individuos padres y selecciona una posición de inicio y fin aleatoria en el primer padre. Luego, copia los valores entre esas posiciones en el hijo. Finalmente, recorre el segundo padre y agrega al hijo los valores que no se han incluido aun. El resultado es un nuevo individuo que combina características de ambos padres y que puede ser evaluado y seleccionado en la siguiente generación del algoritmo evolutivo [62].

Operador de mutación. Este trabajo utiliza como operador de mutación uno basado en la mutación por Intercambio Recíproco [59]. El operador recorre cada gen del individuo y aplica la mutación con una tasa definida por el parámetro p_m . Si el número generado aleatoriamente es menor o igual a p_m , el operador selecciona otro gen aleatoriamente e intercambian los valores de ambos genes en el individuo.

F. Heurísticas MRMLSA

En este trabajo se estudian dos heurísticas MRMLSA competitivas del estado del arte denominados el LRG y SA-LRG [56]. Estas heurísticas reciben como dato de entrada el grafo de red G , el conjunto de peticiones N y una lista de K caminos más cortos para cada par de nodos de la red. Utilizando la información de la distancia de los caminos, estas heurísticas buscan agrupar los destinos cuyos caminos pueden compartir el mismo espectro y nivel de modulación en los enlaces de fibra de un camino óptico. De esta forma pueden construir árboles ópticos para cada nivel de modulación y cada petición multi-difusión. Para reducir el uso de BVT, primero se intenta satisfacer cada solicitud mediante el algoritmo de árbol basado en el camino más corto (*K-shortest-path-based tree*, KSPT). Este algoritmo construye un camino óptico de acuerdo al uso actual del espectro buscando la primera solución que cumpla los criterios necesarios independiente a si esta es la solución más óptima. En caso de que el algoritmo KSPT falle, se ejecutan los algoritmos LRG o SA-LRG.

1) *Algoritmo LRG*: El algoritmo LRG agrupa los destinos de una solicitud de multi-difusión según sus caminos más cortos. Este algoritmo utiliza una medida de relación de uso de enlaces (*Link Sharing*, LR) para indicar la condición de uso de enlaces entre dos caminos. El algoritmo calcula LR de los caminos más cortos para cada par de destinos y se agrupan en un sub-árbol si el LR es mayor o igual que un umbral γ . Al elegir diferentes valores de umbral γ , LRG puede ajustar desde el enfoque de un solo camino óptico ($\gamma = 0$) hasta un bosque óptico ($\gamma = 2$). LRG intenta construir un solo árbol óptico utilizando KSPT. Si este falla, LRG divide el conjunto original de destinos en varios conjuntos de menor tamaño para aliviar el impacto de la fragmentación del espectro [56].

2) *Algoritmo SA-LRG*: El algoritmo SA-LRG agrupa los destinos de una solicitud de multi-difusión según sus caminos factibles. Esto puede mejorar la eficiencia de uso de enlaces en un sub árbol óptico y la utilización del espectro. Para un nivel de modulación m dado y un índice de inicio de espectro f , el algoritmo verifica la factibilidad de un camino hacia un destino no asignado y luego intenta agregarlo a un sub árbol óptico existente o asignarlo a uno nuevo si LR entre el camino factible y el camino seleccionado de otro destino no asignado o destino asignado es mayor o igual que un umbral γ . SA-LRG construye iterativamente sub arboles ópticos en el modo primer ajuste (*First-Fit*, FF) y reserva las ranuras a lo largo de los caminos seleccionados para cada sub árbol óptico. Finalmente, el algoritmo asigna las ranuras reservados y el camino con el consumo mínimo de ranura para cada destino no asignado en la solicitud de multi-difusión [56].

G. Cálculo de las funciones objetivos

La función *fitness* permite evaluar la calidad de cada individuo y guiar el proceso de búsqueda hacia una solución óptima o cercana a la óptima. Para lograrlo se evalúa la aptitud de los individuos en una población, teniendo en cuenta el tipo de red, el individuo permutación y la heurística MRMLSA (ya sea LRG o SA-LRG). El cálculo de la función se inicia con la carga de los caminos cortos previamente calculados para la

red EON correspondiente. A continuación, se recorre cada gen del cromosoma del individuo, que representa la petición de la red, y se procesa con el algoritmo heurístico solicitado. Si el resultado obtenido no es nulo y no se encuentra bloqueado, se retorna el valor del resultado.

V. SIMULACIONES NUMÉRICAS

En la presente sección se presentan el ambiente computacional, las instancias de pruebas, el esquema de simulación y el desempeño obtenidos por los algoritmos implementados. Este trabajo considera en las simulaciones una capacidad de 12,5 GHz por ranura [64].

A. Ambiente Computacional

Todos los algoritmos implementados en este trabajo fueron escritos en lenguaje de programación Java. La meta-heurística GA-MRMLSA con las heurísticas LRG o SA-LRG para construcción del bosque lo denominados en esta sección como GA-LRG o GA-SALRG respectivamente. El desempeño de las meta-heurísticas GA-LRG y GA-SALRG fueron comparados contra las obtenidas por las heurísticas LRG y SA-LRG en las simulaciones numéricas. Los simulaciones fueron realizados en un computador con las siguientes características: Procesador Apple M1 Pro, 16 GB de memoria RAM, y Sistema Operativo macOS Ventura 13.3.1(a).

B. Instancias de pruebas

En las simulaciones llevadas a cabo en este trabajo se utilizaron dos topologías de red: N6S9 [56] (Figura 6) y NSFNET [56] (Figura 7). La distancia en kilómetros de cada enlace se indica mediante los valores correspondientes. La cantidad de ranuras por fibra óptica fue configurada a 320 unidades. Cada ranura fue configurada a una tasa de 12,5 Gbps. Las peticiones se componen de un origen, varios destinos y una capacidad requerida en unidades de Gbps. Las peticiones se generaron de manera aleatoria a partir de parámetros definidos, tales como la cantidad de peticiones, el número de destinos, el grupo de solicitudes y la cantidad de secuencias. Los algoritmos meta-heurísticos, además de los parámetros utilizados por los algoritmos heurísticos, emplearon otros parámetros como el tamaño de la población, el número de generaciones, el número de ejecuciones independientes, el esquema de cruzamiento y la tasa de mutación. Los valores utilizados para los respectivos parámetros se presentan en la Tabla II.

C. Esquema de Simulación

Para realizar la simulación, se generaron K caminos más cortos para cada par de nodos de las topologías de redes de $\mathcal{G} = \{G_1, G_2, \dots, G_{|\mathcal{G}|}\}$ estudiadas. Luego, para cada conjunto de peticiones de $\mathcal{N} = \{N_1, N_2, \dots, N_{|\mathcal{N}|}\}$ se generó el tráfico correspondiente tomando como rango de valores mínimos y máximos, 10 Gbps y 200 Gbps respectivamente. Posteriormente, se ejecutó cada algoritmo de interés $\mathcal{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_{|\mathcal{A}|}\}$ un total de ci corridas independientes. En caso de tratarse de los algoritmos LRG o SA-LRG, se calcularon 300.000 soluciones generadas aleatoriamente y se

seleccionó la mejor de ellas como resultado. Por otro lado, si el algoritmo utilizado correspondía a GA-LRG o GA-SALRG, se llevaron a cabo 30 ensayos con 100 generaciones y 100 individuos por población, lo que resultó en un total máximo de 300.000 soluciones exploradas. De las soluciones generadas se seleccionó la mejor de ellas. El esquema completo de la simulación se puede observar en el Algoritmo 2. Los tiempos de pre-cálculo para las rutas no se encuentran incluidos en los tiempos.

Algoritmo 2: Esquema de Simulación Numérica

Entrada: Conjunto de Algoritmos \mathcal{A} , Conjunto de topologías de redes \mathcal{G} , Número de rutas K
Salida: Imprime Mejores soluciones

```

1 resultados  $\leftarrow \emptyset$ ;
2 para cada topología  $G \in \mathcal{G}$  hacer
3   shortestPath = generarKShortestPath( $G, K$ );
4    $\mathcal{N}$  = generarConjuntoPeticones( $G, K$ );
5   para cada conjunto de peticiones  $N \in \mathcal{N}$  hacer
6     para cada algoritmo  $A \in \mathcal{A}$  hacer
7       para cada corrida  $j \in \{1, 2, \dots, ci\}$  hacer
8         resultados $_{G,N,A,j} \leftarrow$  MRMLSA( $G, N, A$ );
9       fin
10    fin
11  fin
12 fin
13 imprimir(resultados);

```

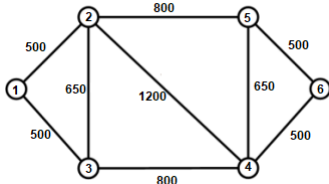


Figura 6: Topología N6S9 de 6 nodos y 9 enlaces

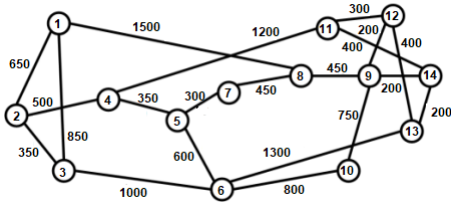


Figura 7: Topología NSFNET de 14 nodos y 21 enlaces

Los parámetros evolutivos de las meta-heurísticas se describen en la Tabla II. Las mismas fueron tomadas a modo experimental.

Tabla II: Parámetros Evolutivos

Parámetro	Símbolo	Valor
Tamaño Población	cp	100
Número de Generaciones	cg	100
Número de Convergencia	ce	10
Número de Corridas Independientes	ci	30
Probabilidad de Mutación	p_m	10 %

D. Resultados de simulaciones

Se realizaron simulaciones utilizando el conjunto de algoritmos $\mathcal{A}=\{\text{LRG, SALRG, GA-LRG y GA-SALRG}\}$ en

las topologías de red $\mathcal{G}=\{\text{N6S9, NSFNET}\}$, considerando los conjuntos de peticiones $\mathcal{N} = \{N_1, N_2, N_3, N_4, N_5\}$ con 5, 10, 15, 30 y 50 peticiones respectivamente. La Figura 8 presenta las curvas que representan las mejores soluciones de cada algoritmo en cada carga de tráfico. Las pruebas de estadística t-test sobre el conjunto de soluciones tomando cada par de algoritmos muestran una consistencia para un nivel de significancia del 5 %. Los resultados en cuanto al índice máximo en ambas topologías son similares; los algoritmos tienen un comportamiento similar hasta 15 peticiones, pero GA-SALRG y SA-LRG obtienen mejores resultados con cargas superiores.

En cuanto al número de BVT utilizados, se observa que a medida que aumenta el número de peticiones, el algoritmo GA-SALRG demuestra un mejor desempeño en términos de la cantidad de BVT requeridos, siendo la mejor solución para la carga con 50 peticiones.

Al analizar los valores de los tiempos, SA-LRG es el que requiere más tiempo de computo para las 300.000 peticiones generadas aleatoriamente, mientras que los otros enfoques demuestran ser más rápidos. GA-SLRG es especialmente rápido al converger antes hacia la solución por lo que no llega a explorar 300.000 peticiones.

Finalmente, sólo GA-LRG y LRG presentan bloqueos. Esto es debido a las características de utilizar siempre el camino más corto, lo cual puede estar sobrecargado y generar bloqueos en consecuencia.

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan dos meta-heurísticas (GA-LRG y GA-SALRG) basadas en Algoritmos Genéticos, para resolver el problema MRMLSA en EON. Los algoritmos fueron evaluados en dos topologías de red y se utilizaron cinco conjuntos de solicitudes de tamaño creciente para analizar su desempeño. Las propuestas fueron comparadas contra dos heurísticas competitivas del estado del arte LRG y SALRG. Los resultados muestran que los algoritmos meta-heurísticos tienen la capacidad de mejorar su rendimiento a medida que aumenta la complejidad del problema. Además, se encontró que el algoritmo GA-LRG es el más eficiente en términos de tiempo de ejecución, seguido por GA-SALRG, mientras que el LRG y SA-LRG tienen un mayor tiempo de ejecución. Se observó que el GA-SALRG es más eficiente que el GA-LRG en términos del número de BVT y ranuras de frecuencias requeridas a medida que aumenta la cantidad de peticiones. Finalmente, sólo los algoritmos LRG y GA-LRG presentaron bloqueos mientras que los basados en SA-LRG son mejores.

Como trabajo futuro los autores proponen extender este estudio en escenarios más complejos y considerar otros tipos de imperfecciones del canal óptico y supervivencia a fallas de simple enlace.

REFERENCIAS

- [1] J. Z. X. Y. B. C. Ziyang Yu, Yongli Zhao and X. Lin, *Multicast Routing and Spectrum Assignment in Elastic Optical Networks*. Asia Communications and Photonics Conference (ACP), 2012.
- [2] N. S. Bijoy Chand Chatterjee and E. Oki, "Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, no. 3, pp. 1776–1800, 2015.

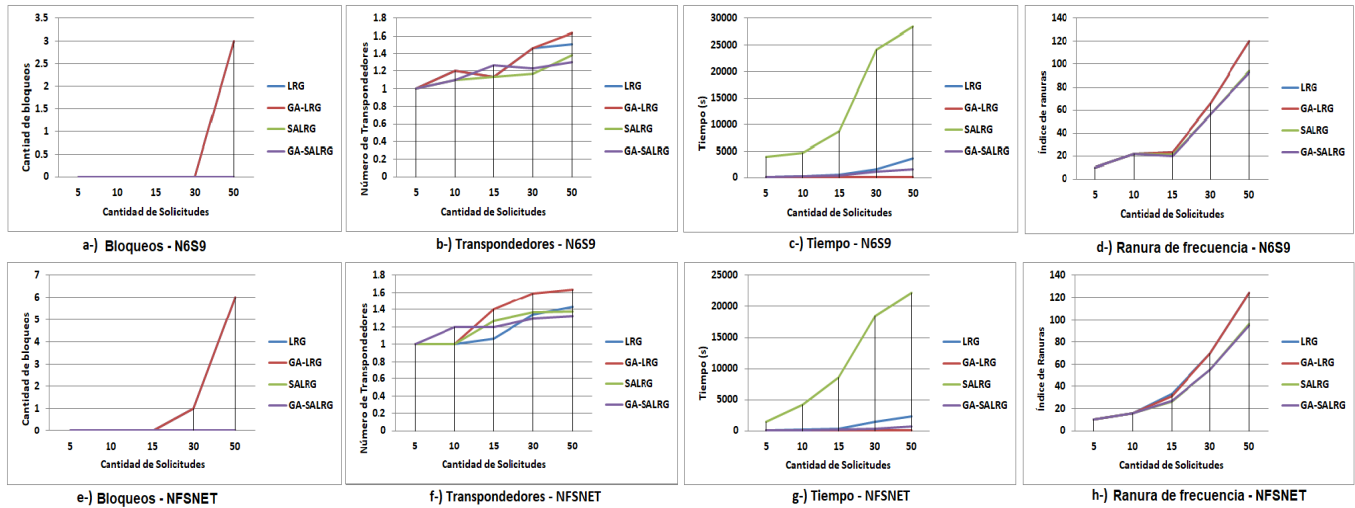


Figura 8: Resultados de las simulaciones

- [3] Q. Wang and L.-K. Chen, "Performance analysis of multicast traffic over spectrum elastic optical networks," in *OFC/NFOEC Technical Digest*. Optical Society of America (OSA), 2012.
- [4] A. M. G. Zhang, M. De Leenheer and B. Mukherjee, "A survey on ofdm based elastic core optical networking," *Surveys Tuts.*, vol. 15, no. 1, pp. 65–87, 2013.
- [5] I. Ríos, C. M. Bogado, D. P. Pinto-Roa, and B. Barán, "A serial optimization and link-oriented based routing approach for rmlsa in elastic optical networks: A comparison among ilp based solution approaches," ser. LANC '18. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2018, p. 48–55. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3277103.3277125>
- [6] D. Benitez, R. Zorrilla, C. F. Bogado-Martínez, D. P. Pinto-Roa, and B. Barán, "Routing, baud rate, code, modulation level, and spectrum assignment in elastic optical networks: A genetic algorithms approach," ser. LANC '22. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022, p. 18–25. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3545250.3560849>
- [7] M. M. R. Villamayor-Paredes, L. V. Maidana-Benítez, J. Colbes, and D. P. Pinto-Roa, "Routing, modulation level, and spectrum assignment in elastic optical networks. a route-permutation based genetic algorithms," *Optical Switching and Networking*, vol. 47, p. 100710, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573427722000467>
- [8] I. T. K. Christodoulou and E. Varvarigos, "Elastic bandwidth allocation in flexible ofdm-based optical networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, no. 9, pp. 1354–1366, 2011.
- [9] B. K. Y. T. Y. S. Masahiko Jinno, Hidehiko Takara and S. Matsuoka, "Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 11, 2009.
- [10] S. F. Martinez and D. P. Pinto-Roa, *Performance evaluation of non-hitless spectrum defragmentation algorithms in elastic optical networks*. 2017 XLIII Latin American Computer Conference (CLEI), Argentina, 2017.
- [11] F. Zhang and col, *Equirements for GMPLS control of flexible grids*. IETF Internet Draft, 2011.
- [12] J. Liu and W. Gu, *Spectrum consecutiveness based routing and spectrum allocation in flexible bandwidth networks*. Chinese Optics Letters, 2012.
- [13] M. R. M. K. J. F.-P. A. Castro, L. Velasco and D. Careglio, "Dynamic routing and spectrum (re) allocation in future flexgrid optical networks," *Computer Networks*, vol. 56, pp. 2869–2883, 2012.
- [14] L. V. Maidana Benítez, M. M. R. Villamayor Paredes, J. Colbes, C. F. Bogado-Martínez, B. Barán, and D. P. Pinto-Roa, "Routing, modulation level, and spectrum assignment in elastic optical networks. a serial stage approach with multiple sub-sets of requests based on integer linear programming," *Mathematical and Computational Applications*, vol. 28, no. 3, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2297-8747/28/3/67>
- [15] K. W. Wojciech Kmiecik, Róża Gościń and M. Klinkowski, "Two-layer optimization of survivable overlay multicasting in elastic optical networks," *Optical Switching and Networking*, vol. 14, pp. 164–178, 2014.
- [16] L. H. Sahasrabudde and B. Mukherjee, "Light - trees: Optical multicasting for improved performance in wavelength-routed networks," *IEEE Communications Magazine*, 1999.
- [17] G. S. Zheyu Fan, Yongcheng Li and C.-K. Chan, "Distance-adaptive spectrum resource allocation using subtree scheme for all-optical multicasting in elastic optical networks multicasting," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, pp. 1460–1468, 2016.
- [18] B. B. S. Fernández-Martínez and D. P. Pinto-Roa, "Spectrum defragmentation algorithms in elastic optical networks." Elsevier, 2014, pp. 7–12.
- [19] B. Li and Y.-C. Kim, "Efficient routing and spectrum allocation considering qot in elastic optical networks." IEEE, 2015, pp. 109–112.
- [20] K. X. Anliang Cai and M. Zukerman, "Comparison of different multicast approaches in elastic optical networks," thesis, 2018.
- [21] I. Ríos, "Enrutamiento, nivel de modulación y asignación de espectro en redes Ópticas elásticas: Una comparación entre enfoques de enrutamiento orientados a enlace y a camino," thesis, 2017.
- [22] A. Pagés and col, "Optimal route, spectrum, and modulation level assignment in split-spectrum-enabled dynamic elastic optical networks." Elsevier, 2014, pp. 114–126.
- [23] J. P. Jue, "Lightpath establishment in wavelength-routed wdm optical networks," thesis, 2017.
- [24] D.-R. Din and I.-R. Lai, "Multicast protection problem on elastic optical networks using segment-base protection," in *IEEE Communications Magazine*. IEEE, 1999.
- [25] M. Aibin and K. Walkowiak, "Different strategies for dynamic multicast traffic protection in elastic optical networks," in *IEEE*. IEEE, 2016, pp. 176–180.
- [26] X. L. W. Z. W. L. Long Gong, Xiang Zhou and Z. Zhu, "Efficient resource allocation for all-optical multicasting over spectrum-sliced elastic optical networks," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, pp. 836–847, 2013.
- [27] S. Yang and F. Kuipers, "Impairment-aware routing in translucent spectrum-sliced elastic optical path networks," in *17th European Conference on Networks and Optical Communications*. Optical Networking, 2012.
- [28] R. L. G. S. Anliang Cai, Jun Guo and M. Zukerman, "Multicast routing and distance-adaptive spectrum allocation in elastic optical networks with shared protection," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, pp. 4076–4088, 2016.
- [29] L. G. Xiahe Liu and Z. Zhu, "On the spectrum-efficient overlay multicast in elastic optical networks built with multicast-incapable switches," in *IEEE Communications Letters*. IEEE, 2013.
- [30] M. W. Krzysztof Walkowiak, Róża Gościń and M. Klinkowski, "Joint optimization of multicast and unicast flows in elastic optical networks," in *Optical Networks and Systems Symposium*. IEEE, 2015.
- [31] H. B. Ahmad Fallahpour and J. A. Salehi, "Energy-efficient manycast routing and spectrum assignment in elastic optical networks for cloud

- computing environment,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, pp. 4008–4018, 2015.
- [32] K. X. Anliang Cai and M. Zukerman, “Comparison of different multicast approaches in elastic optical networks,” in *20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. IEEE, 2018.
- [33] G. M. L. Kou and L. Berman, “A fast algorithm for steiner trees,” *Acta Informatica*, vol. 15, pp. 141–145, 1981.
- [34] G. L. L. T. Evrim Guler, Danyang Zheng and X. Cao, “Virtual multicast tree embedding over elastic optical networks,” *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, 2017.
- [35] R. G. Michał Aibin and K. Walkowiak, “Multicasting versus anycasting: How to efficiently deliver content in elastic optical networks,” in *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. IEEE, 2016.
- [36] W. Z. Xiahe Liu and Z. Zhu, “Efficient resource allocation for all-optical multicasting over spectrum-sliced elastic optical networks,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, pp. 836–847, 2013.
- [37] Y. M. Soubhik Deb, Hiroshi Hasegawa and K. ichi Sato, “Impairment-aware optical multicast tree design with modulation format optimization,” in *Photonics in Switching*. Optical Networking, 2015.
- [38] Y. W. W. L. L. G.-S. Y. Zuqing Zhu, Xiahe Liu and N. Ansari, “Impairment- and splitting-aware cloud-ready multicast provisioning in elastic optical networks,” in *IEEE/ACM Transactions on Networking*. IEEE, 2016.
- [39] M. Markowski, “Algorithms for deadline-driven dynamic multicast scheduling problem in elastic optical networks,” in *Third European Network Intelligence Conference*. IEEE, 2016.
- [40] Y. T. L. Z. T. G.-B. G. Chen Xue, Xin Li and S. Huang, “Light-tree based multicast flow aggregation scheme in elastic optical datacenter networks,” in *16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*. IEEE, 2017.
- [41] A. K. K. Walkowiak and M. Woźniak, “Algorithms for calculation of candidate trees for efficient multicasting in elastic optical networks,” in *ICTON*. IEEE, 2015.
- [42] M. K. Krzysztof Walkowiak, Róża Gościńska and M. Wozniak, “Optimization of multicast traffic in elastic optical networks with distance-adaptive transmission,” *IEEE Communications Letters*, vol. 18, pp. 2117–2120, 2014.
- [43] D. A. Davis and V. M. Vokkarane, “Resource survivability for multicast in elastic optical networks,” in *17th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks)*. IEEE, 2016.
- [44] F. Z. B. C. M. M. Lulu Yang, Long Gong and Z. Zhu, “Leveraging light forest with rateless network coding to design efficient all-optical multicast schemes for elastic optical networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, pp. 3945–3955, 2015.
- [45] W. S. Hu and Q. J. Zeng, “Multicasting optical cross connects employing splitter-and-delivery switch,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, pp. 970–972, 1998.
- [46] G. B. F. P. A. M.-A. B. F. C. L. P. N. Sambo, G. Meloni and P. Castoldi, “Demonstration of data and control plane for optical multicast at 100 and 200 gb/s with and without frequency conversion,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, pp. 667–676, 2013.
- [47] R. L. Anliang Cai, Moshe Zukerman and G. Shen, “Survivable multicast routing and spectrum assignment in light-tree-based elastic optical networks,” in *Asia Communications and Photonics Conference (ACPC)*. Optical Society of America, 2015.
- [48] D. Bulira, “Multicast-based dynamic routing of many-to-many flows in elastic optical networks,” *Third European Network Intelligence Conference*, 2016.
- [49] J. J. P. C. R. Menglu Zeng, Wenjian Fang and Z. Zhu, “Orchestrating multicast-oriented nfv trees in inter-dc elastic optical networks,” in *IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2016.
- [50] L. G. Xiahe Liu and Z. Zhu, “Design integrated rsa for multicast in elastic optical networks with a layered approach,” in *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*. Optical Networks and Systems Symposium, 2013.
- [51] B. G. Xin Li, Shanguo Huang and Y. Zhao, “Distributed sub-light-tree construction scheme for multicast services in elastic optical data center networks,” *2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 2017.
- [52] L. G. Lulu Yang and Z. Zhu, “Incorporating network coding to formulate multicast sessions in elastic optical networks,” in *Optical and Grid Networking. International Conference on Computing, Networking and Communications*. Optical Networking, 2016.
- [53] X. L. B. G. S. H. Tao Gao, Weixia Zou and B. Mukherjee, “Distributed sub-light-tree based multicast provisioning with shared protection in elastic optical datacenter networks,” *Optical Switching and Networking*, vol. 31, pp. 39–51, 2018.
- [54] G. S. Zheyu Fan, Yongcheng Li and C. C.-K. Chan, “Dynamic resource allocation for all-optical multicast based on sub-tree scheme in elastic optical networks,” in *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2016.
- [55] J. Y. W. Xijun Zhang and C. Qiao, “Constrained multicast routing in wdm networks with sparse light splitting,” *Journal of lightwave Technology*, vol. 18, pp. 1917–1927, 2000.
- [56] G. S. V. Zheyu Fan, Yongcheng Li and C.-K. Chan, “Distance-adaptive spectrum resource allocation using subtree scheme for all-optical multicasting in elastic optical networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, pp. 1460–1468, 2017.
- [57] K. Deb, “An introduction to genetic algorithms,” *Sadhana*, vol. 24, no. 4-5, pp. 293–315, 1999.
- [58] S. J. Russell and P. Norvig, *Inteligencia Artificial: un enfoque moderno*, 2004, no. 04; Q335, R8y 2004.
- [59] A. E. Eiben, J. E. Smith *et al.*, *Introduction to evolutionary computing*. Springer, 2003, vol. 53.
- [60] M. Mitchell, *An introduction to genetic algorithms*. MIT press, 1998.
- [61] D. Simon, *Evolutionary optimization algorithms*. John Wiley and Sons, 2013.
- [62] C.-J. Soong, R. A. Rahman, R. Ramli, M. S. A. Manaf, C.-C. Ting *et al.*, “An evolutionary algorithm: An enhancement of binary tournament selection for fish feed formulation,” *Complexity*, vol. 2022, 2022.
- [63] L. Davis, “Job shop scheduling with genetic algorithms,” in *Proceedings of the first International Conference on Genetic Algorithms and their Applications*. Psychology Press, 2014, pp. 136–140.
- [64] R. I.-T. G.694.1, *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*. International Telecommunications Union, 2012.