

Routing and Spectrum Allocation in Elastic Networks.

An approach based on Multi-objective Evolutionary Algorithms

Carmelo Fretes
Facultad Politécnica
Universidad Nacional de Asunción,
Paraguay
carmelofretes@gmail.com

Diego Pintos
Facultad Politécnica
Universidad Nacional de Asunción,
Paraguay
dpinto@pol.una.py

Ysapy Mymbi Ortiz
Facultad Politécnica
Universidad Nacional de Asunción,
Paraguay
ysapymimbi@gmail.com

ABSTRACT

El aumento en el tráfico de red y la necesidad de aumentar la capacidad y el rendimiento de los tramos de las redes de transporte, nace el interés por las redes elásticas. En la actualidad la tecnología de transporte óptico utilizada en las redes ópticas, es la multiplexación por longitud de onda (WDM); esta tecnología tiene la capacidad de transportar, enrutar y asignar (Routing Wavelength Assignment) múltiples canales en una misma fibra basándose en portadoras de diferentes longitudes de onda. Esto implica que canales con tienen poca demanda que la máxima soportada, infrautilicen recursos. Por consiguiente la flexibilización de la rejilla espectral sería la solución, permitiendo la transmisión, enrutamiento y asignación. (Routing and Spectrum Assignment) de canales con ancho de banda variable que se ajusten a la demanda.

En redes WDM los algoritmos de planificación de enrutado y asignación de longitud de onda (RWA), buscan una ruta física a través de la red y asignan una longitud de onda para el transporte, la selección de esa longitud de onda está condicionada a que sea la misma durante el recorrido de la ruta física, esta condición es llamada condición de continuidad. En las redes ópticas elásticas, los algoritmos de planificación de enrutado y asignación de espectro (RSA), aparte de la condición mencionada existe una nueva condición, que es la de condición de contigüidad en el espectro. Esta condición estipula que los frequency slots que ocupe cada canal deben estar juntos en el espectro. El problema de RSA se puede atacar como el enrutado y la asignación de espectro conjuntamente. Con este planteamiento del problema RSA, la mayor dificultad que se presenta, es el gran número de condiciones que plantea el problema; se introduce una mayor complejidad de cómputo a la hora de calcular el camino óptimo para cada petición optimizando a su vez, la asignación de espectro.

La heurística propuesta en este trabajo es un algoritmo evolutivo multiobjetivo que determina un conjunto de soluciones óptimas de Pareto que son no dominadas con respecto a las otras para el problema RSA.

Las distintas pruebas realizadas con este algoritmo muestran resultados promisorios con respecto al paper presentado en [16].

KEYWORDS

RWA, RSA, WDM Networks, Elastic Optical Networks, Multi-objective Optimization, Genetic Algorithms.

1 INTRODUCTION

El nacimiento del interés por las redes elásticas proviene por el constante aumento en el tráfico de red y la necesidad de aumentar la capacidad y el rendimiento de los tramos en las redes de transmisión. En la actualidad la tecnología de transporte utilizada en redes ópticas es la multiplexación por longitud de onda (WDM). Esta tecnología es capaz de transportar múltiples canales en una misma fibra, basándose en portadoras de distintas longitudes de onda. La implicancia de esta tecnología es que los canales que tengan una demanda reducida a la máxima soportada por la granularidad impuesta, infrautilicen recursos; dado a esto y a que el tráfico de red será altamente heterogéneo, la flexibilización en la disposición de los recursos de la red óptica es un reto. Un cambio importante en la arquitectura de las redes ópticas elásticas es la sustitución de la rejilla fija por una nueva flexible. La ITU-T se encuentra trabajando en la revisión de un nuevo estándar G.694.1 [4]

El espectro óptico de la banda C (1530-1565 nm) es dividido en ranuras (frequency slots) de un tamaño fijo [5] y se le asigna una frecuencia central (CF) a cada Elastic Optical Path (EOP) que deben coincidir con el principio o el final de éstas ranuras. Para cumplir con demandas de ancho de banda cada vez mayores, las redes ópticas elásticas son indispensables.

Para generar un elastic optical path (EOP), podemos dividir en operaciones de enrutado, donde se realizan cálculos de la ruta entre el nodo origen y el destino a través de una topología de red y la selección de recursos espectrales que se asignarán a la petición (Spectrum Allocation, SA) definidos por una frecuencia central y un ancho de banda (Slot width). En redes WDM los algoritmos de planificación de enrutado y asignación de longitudes de onda, buscan una ruta física a través de la red y

asignan una longitud de onda para el transporte de ese canal. La selección de esa longitud de onda está condicionada a que sea la misma durante el recorrido de la ruta física, para que de esta manera no sea necesario usar conversores de longitud de onda en ningún salto. A esta condición se le llama, condición de continuidad (continuity constraint). En las redes elásticas, aparte de esta condición, existe una nueva condición que es la de contigüidad en el espectro (contiguity constraint). Esta última condición quiere decir que los frequency slots que ocupe el canal deben estar juntos en el espectro.

Para la resolución de los numerosos problemas que tienen múltiples objetivos, una buena meta-heurística para este tipo de problemas son los algoritmos evolutivos (EA – Evolutionary Algorithm). Los GA tradicionales son personalizados para adaptarse a los problemas multiobjetivos, mediante el uso de funciones fitness especializados y la introducción de métodos para promover la diversidad de la solución. Existen enfoques generales para la optimización de múltiples objetivos. Uno es combinar las funciones objetivos individuales en una única función compuesta o mover todos, menos uno de los objetivos para el conjunto de restricciones. El siguiente enfoque es determinar todo un conjunto de soluciones óptimas de pareto o un subconjunto representativo. Un conjunto óptimo de pareto es un conjunto de soluciones que son no dominadas con respecto a las otras.

En este trabajo, que es una extensión del trabajo realizado en [10] se propone un enfoque basado en una heurística de Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo (MOEA) para el problema de RSA, en la cual se determina que el enfoque propuesto mejora en términos de calidad del frente de pareto al trabajo presentado en [16]. El MOEA optimiza el espectro utilizado y el costo total, sujeto a las restricciones de continuidad, contigüidad y conflicto del espectro.

Nuestro trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera, una primera parte (sección 2) donde explicamos conceptualmente la diferencia existente entre redes WDM y redes EON, haciendo énfasis a la importancia de la flexibilización del espectro para el mejor aprovechamiento del espectro, así también una introducción básica a la arquitectura de las redes EON. En la siguiente sección (sección 3) pasamos a explicar conceptualmente el problema de enrutamiento y asignación de espectro (RSA) en redes EON. En la sección 4, los conceptos de Frente de Pareto y Dominancia. En la sección 5, los trabajos relacionados y el estado del arte. En la siguiente parte (sección 6), nuestro problema propuesto, en la sección 7, la implementación del MOEA, en la sección 8, el entorno experimental y pruebas, los parámetros utilizados para el MOEA, la exposición de los resultados y la diferencia en la performance entre el algoritmo [16] versus nuestro algoritmo propuesto MOEA. Y por último (sección 9), conclusiones y futuros trabajos.

2 REDES OPTICAS

Una red consiste en la colección de nodos interconectados por enlaces. Estos enlaces requieren equipos de transmisión, mientras que los nodos requieren equipos de conmutación. Los distintos desarrollos e investigaciones tecnológicas han demostrado que la

óptica es una de las mejores para la transmisión de señales, puesto que ésta puede amplificar simultáneamente múltiples señales de longitud de onda en un sola conexión de fibra.

Por lo tanto, una red óptica no es necesariamente totalmente óptica: la transmisión es ciertamente óptica, pero la conmutación podría ser óptica, eléctrico, o híbrido [7].

2.1 Redes Ópticas basadas en WDM

En redes de Multiplexación por división de longitud de onda WDM, el objetivo es transmitir múltiples longitudes de onda en una misma fibra óptica simultáneamente sin superponerse. El rango de longitudes de onda utilizado en la fibra puede ser dividido en varias bandas. La necesidad de estandarización de las redes WDM hizo que la International Telecommunications Union (ITU) desarrollara un estándar. El estándar de longitudes de onda, es llamado ITU-grid y fue definido en el 1550 nm de la región de baja pérdida de la fibra, específicamente esta grilla está en una frecuencia de 193.1 THz, que corresponde a una longitud de onda de 1552,52 nm [7]. Cada uno de estos canales a distinta longitud de onda, pueden transmitir señales de diferentes velocidades y formato. Por lo tanto, al permitir múltiples canales WDM que coexisten en una sola fibra, se puede aprovechar el gran ancho de banda de la fibra [7].

El esquema de funcionamiento de una red óptica utilizando la tecnología WDM, podemos describir a continuación: cada señal transmitida utiliza una longitud de onda, las cuales son multiplexadas a través de un multiplexador de longitud de onda para ser transmitidas a través de la red. Usualmente se utilizan amplificadores de potencia en los enlaces para mantener la calidad de la señal. Luego son añadidas o removidas señales mediante el ADD/DROP Multiplexer Reconfigurable (ROADM, Reconfigurable Add Drop Multiplexer) llegando finalmente la señal resultante al demultiplexador en el nodo receptor, que se encarga de separar las longitudes de onda [10]. En la siguiente figura se puede apreciar el esquema de una red óptica WDM.

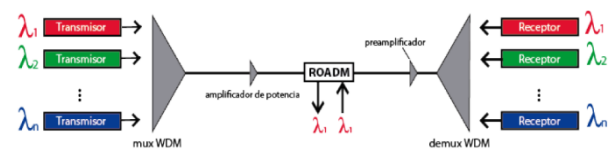


Figura 2.1: Esquema de una red óptica WDM

Los componentes básicos en un nodo, en el cual se reciben las señales ópticas provenientes de las fibras y luego los demultiplexores se encargan de demultiplexar o separar las longitudes de onda. Al separar las longitudes de onda, las matrices de conmutación se encargan de redirigir dichas longitudes de onda al puerto de salida pre-establecido para cada una de ellas. Por último el multiplexador de longitud de onda, reúne las longitudes de onda y encamina la señal óptica por el siguiente enlace. Esto se puede apreciar en la figura 2.2.

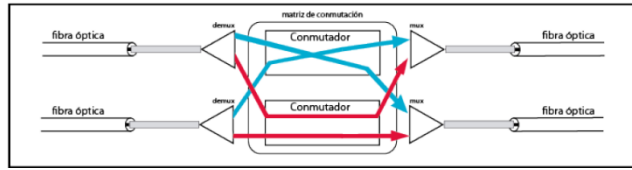


Figura 2.2: Componentes básicos de un nodo

Esta tecnología se basa en la transmisión de canales ópticos sobre una misma fibra de igual ancho de banda, sobre una rejilla espectral fija establecida por la ITU-T [9]. En este enfoque, los canales de transmisión poseen un ancho de banda fijo, esto hace que se restrinja la capacidad de la red de adaptarse a las necesidades reales de transmisión y la posibilidad de seguir creciendo en la capacidad de transmisión a largas distancias. Bajo esta necesidad nace un nuevo paradigma que son las redes ópticas flexibles o redes ópticas elásticas.

2.2 Redes Ópticas Elásticas

Como se expuso en el apartado anterior, la necesidad de darle mayor capacidad a la red de poder adaptarse a las necesidades de transmisión y aumentar la capacidad y el rendimiento de los tramos centrales y como la demanda de tráfico de red va creciendo, nace el nuevo paradigma que llamamos, redes ópticas elásticas, EON (Elastic Optical Network), por sus siglas en inglés. Podemos definir las EON como una OTN (Optical Transport Network) donde todo el equipamiento y el plano de control pueden manejar canales ópticos de ancho de banda variable y todos los elementos de conmutación pueden soportar distintas granularidades en el espectro de los canales que transmiten información. La red óptica tradicional basada en WDM divide el espectro en canales separados. La separación entre canales adyacentes es entre 50 GHz y 100 GHz que es especificada por la ITU. La separación entre canales es muy grande y si cada canal contiene un bajo ancho de banda utilizado y no hay tráfico el esa brecha libre, se desperdicia gran parte del espectro. Para explotar completamente una red, aparte de flexibilizar en ancho de banda de los canales, es necesario contar con una arquitectura de red que permita la transmisión de diferentes formatos de señal para la transmisión.

Las EON introducen la granularidad fija en el ancho de banda de los canales transportados a través de la fibra. La ITU-T G.694.1, establece una serie de rejillas espectrales fijas, que dividen el espectro óptico entre 1530-1565 nm, de la banda C, que van desde los 12.5 GHz. (Giga Herz) hasta los 100 GHz, donde las más utilizadas son las de 50 GHz y 100 GHz [11].

El cambio importante en la arquitectura EON es la sustitución de la rejilla fija (Fixed-grid) por una nueva flexible (Flexi-grid). La ITU-T se encuentra abocada en la revisión de un estándar G.694.1 [11], para una división del espectro óptico flexible llamado flexi-grid. Para ello se definió el espectro óptico de la banda C (1530-1565 nm), el cual se divide en FS (Frequency Slots) de tamaños fijos de 6.25, 12.5, 25 y 50 GHz. [12] y además se asigna una frecuencia central (CF, Central Frequency) a cada camino óptico elástico (EOP – Elastic Optical Path) que debe coincidir con el principio o el final de estas ranuras. En la figura 2.3 se puede observar las diferencias

existentes en un esquema de rejillas fijas y un esquema de rejillas flexibles. En el caso del esquema de rejilla fija, podemos observar el ineficiente uso de espectro debido a la división fija que posee el espectro de 50 GHz entre cada CF's; y si observamos el esquema de rejillas flexibles se puede notar el espectro libre obtenido gracias a la fina granularidad que ofrece y que permite asignar de manera flexible sólo el ancho de banda requerido.

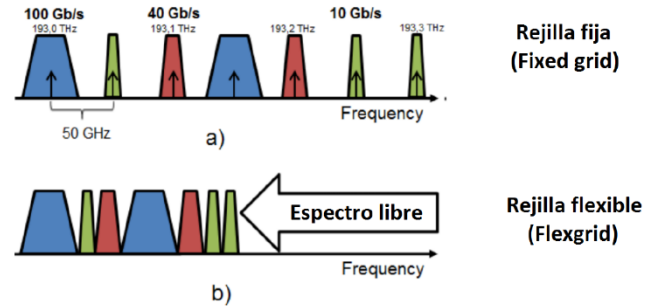


Figura 2.3: a) Esquema de asignación de espectro rejilla fija, b) Esquema de asignación de espectro rejilla flexible

3 ENRUTAMIENTO Y ASIGNACION DE ESPECTRO

Las EON mejoran mucho la tasa de transmisión de datos ya que divide el espectro en porciones de frecuencias llamadas FS, permitiendo utilizar con más eficiencia las bandas definidas por la ITU-T.

El problema de establecer caminos para cada petición seleccionando una ruta adecuada y asignando el ancho de banda requerido se denomina, Problema RSA [13].

El problema de RSA en Redes Ópticas Elásticas es similar al problema de enrutamiento y asignación de longitudes de onda (RWA – Routing Wavelength Allocation) en redes basadas en WDM. La diferencia entre ambas (RSA y RWA) es la capacidad de asignar de manera flexible el espectro de frecuencia. El RSA es considerado un problema NP-Completo [14], y se clasifican en dos tipos: Online o Dinámico y Offline o estático. En el caso del problema RSA offline, ya se tiene como dato de entrada la lista de todas las solicitudes de transmisión, para proceder al análisis y la resolución con ese dato de entrada. Para el problema RSA online, el análisis y resolución se hace a medida que van llegando las solicitudes dinámicamente.

4 FRENTE DE PARETO Y DOMINANCIA. CONCEPTOS

En esta sección definimos el concepto de dominancia y frente de pareto para soluciones de problemas multiobjetivo. Se dice que las soluciones de un problema con objetivos múltiples son óptimas porque ninguna otra solución es superior a ellas cuando se tienen en cuenta todos los objetivos y restricciones al mismo tiempo. Puede decirse que ningún objetivo puede mejorarse sin degradarse a los demás objetivos. Al conjunto de soluciones óptimas se le conoce como soluciones Pareto Óptimas, en los cuales tienen múltiples objetivos a cumplir y presentan conflictos al realizar la optimización simultánea de los mismos. A partir de este concepto se establece como requisito para afirmar que una

situación es mejor que la otra, el que en ella no se disminuya a nadie, pero se mejore a alguno; es decir que una situación será mejor que otra, sólo si en la nueva es posible compensar las pérdidas de todos los perjudicados. En la figura 3, se puede observar los conjuntos óptimos de pareto para diferentes escenarios con dos objetivos y para el mismo espacio de soluciones. En cualquier caso el óptimo de pareto siempre está compuesto por soluciones ubicadas en el borde de la región factible del espacio de soluciones.

La Dominancia de Pareto en un contexto de minimización, dice: que una solución $x^{(1)}$ domina a otra solución $x^{(2)}$ si se cumplen las siguientes condiciones: 1) La solución $x^{(1)}$ no es peor que $x^{(2)}$ en todos los objetivos. 2) La solución $x^{(1)}$ es estrictamente mejor que $x^{(2)}$ en por lo menos un objetivo.

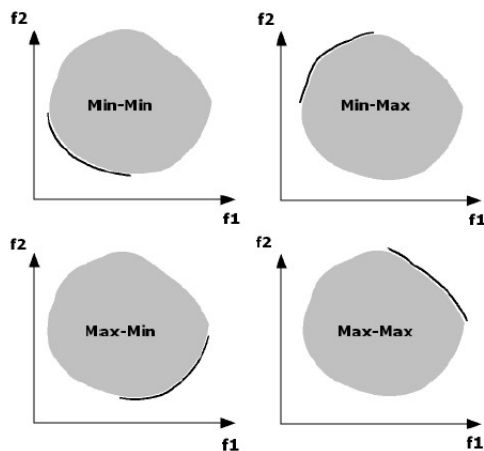


Figura 3: Frentes Óptimos de Pareto para el mismo espacio de soluciones

5 TRABAJOS RELACIONADOS

Como el RSA es considerado un problema NP-Completo [14], ha sido tratado con varias técnicas, exactas y heurísticas, tanto como para el tráfico dinámico como para el tráfico estático. Entre las técnicas exactas se encuentran el ILP, mientras que entre las heurísticas se encuentran las optimizaciones con Colonia de Abejas (BCO, Bee Colony Optimization) [18], los Algoritmos Genéticos (GA, Genetic Algorithm) [19] [20] [1] [21], entre otros [22] [23].

Diferentes modelos ILP para instancias pequeñas y distintas heurísticas para escenarios más reales, han sido utilizados exitosamente para resolver el problema RSA. Como ejemplo podemos citar en [24] se propuso un modelo ILP para minimizar el uso del espectro para servir a una matriz de tráfico en un EON. Los autores proponen un método que divide el problema en dos subproblemas, el primero es el ruteo y el segundo es la asignación de espectro y los resuelve secuencialmente, utilizando un enfoque basado en rutas. También proponen un algoritmo heurístico que sirve las conexiones una a una en forma secuencial. Luego en [3], los autores amplían sus resultados previos incluyendo la consideración del nivel de modulación en la formulación ILP. Con

esta nueva consideración, se definió un nuevo problema llamado Enrutamiento, Nivel de Modulación y Asignación de Espectro (RMLSA, *Routing Modulation Level Spectrum*), quedando fuera del alcance de este trabajo. Tampoco se consideran otros problemas como *Fragmentation Aware* y *Tráfico Dinámico*. Otra formulación ILP y la prueba de que el problema RSA es un problema NP-completo podemos encontrar en el trabajo presentado en [14]. En [], son expuestos las diferencias entre un ILP para RWA y para RSA, así también se realiza un análisis de complejidad de algoritmo. En el mismo trabajo son expuestos dos algoritmos RSA. Estos tienen un mejor rendimiento que el ILP en redes de mayores dimensiones. Con estos dos algoritmos heurísticos, el tiempo computacional fue reducido, lo que es considerado una mejora comparado con el ILP, con el cual se diferencia en horas de cómputo. El trabajo propuesto en [16], se presenta el problema RSA multiobjetivo y su modelo de algoritmo asociado. Cada solicitud tiene muchas rutas posibles, y en cada enrutamiento tiene varias opciones de asignación de espectro. El problema es minimizar el ancho del espectro para soportar todas las solicitudes y minimizar el costo general del espectro en el enlace.

La función objetivo para este trabajo es la siguiente: hay dos objetivos asociados a cada cromosoma. El primer objetivo f_1 , es el ancho del espectro que indica el máximo slice indexado utilizado en la red. El segundo objetivo f_2 es el costo total del enlace del espectro. Dado un cromosoma, se calculan, la ruta y el canal para cada demanda. Después de atender cada demanda secuencialmente, se actualiza el vector de disponibilidades de espectro de cada enlace.

En este trabajo, que es una extensión del trabajo presentado en [10] el cual tiene un enfoque basado en suma ponderada, se presenta un enfoque multiobjetivo puro con frentes de pareto. En nuestro trabajo, así como en [16] tiene muchas rutas posibles, y en cada enrutamiento tiene varias opciones de asignación de espectro. El problema es minimizar el ancho del espectro para soportar todas las solicitudes y minimizar el costo general del espectro del enlace. La misma función objetivo es tomada de [16] y las solicitudes se atienden de la siguiente manera: se ordenan las solicitudes de mayor a menor, definido por el mayor costo posible de dicha solicitud, el primer 30% de dicha lista es atendido en primer lugar, mientras que el 70% restante es atendido de manera aleatoria, a diferencia de [16] que lo atiende de manera secuencial.

6 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En EON basados en OFDM, la demanda de tráfico entre el par de nodos fuente y destino es transmitida a través de múltiples subportadoras de baja velocidad. Dada la topología física, la matriz de demandas y una lista de rutas precalculadas (K-shortestpath).

Necesitamos, satisfacer todas las demandas de conexión fuente-destino: determinar la ruta y la asignación de espectro para cada demanda de tráfico. Optimizar la utilización del espectro: minimizar el Máximo FS utilizado sobre todas las fibras de la red. Optimizar la distancia recorrida: minimizar la suma de la distancia recorrida. Optimizar el costo total: en función a la distancia recorrida y los FS solicitados.

Para el modelo propuesto son establecidos los siguientes supuestos: El recurso espectral de cada fibra óptica se divide en FS; la capacidad de la fibra en términos de FS está limitada en todos los enlaces; las demandas de conexiones son bidireccionales, y debe encontrarse una ruta óptica completa de extremo a extremo para cada demanda; No se da ninguna ruta específica para una conexión de antemano, cualquier ruta posible de las rutas precalculadas y cualquier conjunto posible de FS contiguos se evaluarán mientras se resuelve el modelo; la solicitud está representada por tres tuplas (s, d, α_d) , incluyendo el nodo fuente s , el nodo destino d , y el ancho de banda/velocidad de datos demandada α considerada en cantidad de FS solicitados.

7 IMPLEMENTACION DEL MOEA

Nuestro algoritmo comienza con la creación de la población inicial. Las mejores soluciones se encuentran a lo largo de varias generaciones. Los operadores tales como cruce y mutación exploran otras posibles soluciones. En nuestro enfoque, no todos los individuos son soluciones viables, por lo tanto, se requieren procedimientos adicionales de manejo de restricciones y cuando se cumple el criterio de parada, se encuentran soluciones relativamente buenas.

En esta implementación, el objetivo es encontrar la ruta y el conjunto de FS para cada solicitud, tal que, se minimicen la distancia total recorrida, el máximo FS utilizado y el costo total; todo esto cumpliendo con las respectivas restricciones de RSA.

La implementación del MOEA se describe a continuación en los algoritmos 2, 3 y 4.

Algoritmo 1 MOGA

ENTRADA: Tabla de rutas P; Cantidad total de FS; Lista de demandas; Tamaño de la población; Probabilidad de mutación; Criterio de Parada; Algoritmo de Asignación de FS; Distancia Total, FS Máximo, Costo Máximo

SALIDA: Mejor solución

- 1: InicializarPoblacion(P)
 - 2: EvaluarPoblacion(P)
 - 3: ranqueoPareto(P)
 - 4: **mientras** No se cumple el criterio de parada **hacer**
 - 5: $P' = \text{SeleccionarPadres}(P)$
 - 6: $N = \text{Cruce}(P')$
 - 7: $N' = \text{Mutar}(N)$
 - 8: $S = \text{AsignaciónDeEspectro}(N')$
 - 9: $S' = \text{EvaluarPoblación}(S)$
 - 10: ranqueoPareto(S')
 - 11: $P = \text{SeleccionarMejoresIndividuos}(S', P)$
 - 12: Fin mientras
 - 13: **retornar** MejorSolución(P)
-

Algoritmo 2 Evaluación de población

ENTRADA: Población P

SALIDA: Población evaluada

- 1: **para** cada *Individuo* $\in P$ **hacer**
 - 2: Fitness = EvaluarIndividuo(Individuo)
 - 3: ActualizarFitness(Individuo, Fitness)
-

- 4: fin para
 - 5: **retornar** Población
-

Algoritmo 3 Evaluación de individuo

ENTRADA: Individuo; Distancia Máxima; FS Máximo; Costo Máximo; Tabla de rutas P

SALIDA: Fitness f ; Distancia f_1 ; Espectro f_2 , Costo f_3

- 1: Distancia = 0
 - 2: FSMayor = 0
 - 3: **para** *Gen* \in *Individuo* **hacer**
 - 4: Distancia = Distancia + DistanciaRuta(Gen, P)
 - 5: si FSMayor \leq UltimoFS(Gen) entonces
 - 6: FSMayor = UltimoFS(Gen)
 - 7: **fin si**
 - 8: Costo = Costo + Costo(Gen, P)
 - 9: fin para
 - 10: $f_1 = \text{Distancia} / \text{Distancia Máxima}$
 - 11: $f_2 = \text{FSMayor} / \text{FS Máximo}$
 - 12: $f_3 = \text{Costo} / \text{Costo Máximo}$
 - 13: **retorna** f_1, f_2, f_3
-

En el MOEA presentado en este trabajo, el cromosoma representa un conjunto de solicitudes atendidas. Básicamente el cromosoma es un vector compuesto en el cual cada gen representa una solicitud atendida. Cada elemento de dicho vector contiene: el índice de la ruta asignada (tomada de la tabla de rutas precalculadas), y el índice de los FS asignados de la solicitud.

Los pasos del procedimiento del algoritmo se pueden describir a continuación:

Población Inicial. El primer paso es inicializar la población. El MOEA inicia con una población inicial de cromosomas, definida como se explica a continuación. El Algoritmo atiende las solicitudes en un orden determinado, el cual fue tomado de un trabajo presentado en [1]. En el trabajo, el orden es definido como sigue: se ordenan las solicitudes de mayor a menor, definido por el mayor costo posible de dicha solicitud, el primer 30% de dicha lista es atendido en primer lugar, mientras que el 70% restante es atendido de manera aleatoria. Este orden es representado por las posiciones de los genes en el cromosoma y se mantiene durante toda la ejecución del algoritmo. Para luego, asignar de forma aleatoria las rutas y FS a las demandas, teniendo en cuenta el orden previamente definido. Cada cromosoma codifica una solución válida.

Evaluación de la población. Luego se evalúa dicha población, como se aprecia en el algoritmo 1, en los pasos 2 y 9. La función objetivo a minimizar son, la distancia recorrida, el máximo FS utilizado y el costo total. Con el fin de conducir la búsqueda hacia mejores soluciones, se utiliza como valor Fitness de la implementación, la suma ponderada de las funciones objetivo, normalizando dichos valores.

El valor Fitness se calcula como:

$$f = f_1 + f_2 + f_3$$

y los individuos con mejor Fitness (valores menores de f , por el enfoque de minimización) serán seleccionados para la próxima generación.

Dominancia de pareto. En el paso 3 la población inicial se clasifica en categorías (ranqueo) sobre la base de la no dominancia. A cada solución se le asigna un valor de aptitud igual a su rango de no dominio (el rango 0 es el mejor).

Selección de cromosomas para la siguiente generación. El algoritmo 1 nos muestra que el ciclo inicia con la selección de padres, en el paso 5. Se utiliza el método de muestreo estocástico universal para seleccionar dos padres para producir nuevos individuos para la próxima generación [17]

El muestreo estocástico universal es un algoritmo de muestreo que se implementa en una sola fase. Dado un conjunto de n individuos y sus valores objetivos asociados, el algoritmo los acomoda en una ruleta donde el tamaño de los cortes asignados a cada individuo es proporcional al valor objetivo. Luego, una segunda ruleta, es marcada con y marcadores igualmente espaciados entre sí donde y es el número de selecciones que se desea efectuar. Por último, se gira la ruleta y se selecciona un individuo por cada marcador. La posición de los marcadores indican los individuos seleccionados.

Cruzamiento. Se denomina operador de cruce a la forma de calcular el cromosoma del nuevo individuo en función del cromosoma del padre y de la madre. El operador de cruce es fuertemente responsable de las propiedades del MOEA y determinará en gran medida la evolución de la población; esto se aplica en el paso 6, del algoritmo 1.

En este trabajo se utilizó el operador de cruzamiento de dos puntos [17] mediante el cual se generan aleatoriamente dos puntos de corte en cada reproductor, utilizando los mismos puntos generados, asignando intercaladamente cada segmento generado de los padres a cada hijo.

En la figura 4, podemos observar el procedimiento de cruce en el cual los puntos de corte generados aleatoriamente fueron el 1 y el 2, dividiendo el reproductor en 3 segmentos. El primer segmento del reproductor 1 es asignado al primer segmento del descendiente 1, así también el primer segmento del reproductor 2 es asignado al primer segmento del descendiente 2. Luego, el segundo segmento del reproductor 1 es asignado al segundo descendiente, mientras que el segundo segmento del reproductor 2 se asigna como segundo segmento del primer descendiente. Entonces los últimos segmentos se intercalan, dando como resultado ambos descendientes mostrados en la figura 4. Este proceso se repite hasta cruzar toda la población actual y obteniendo como resultado la generación de una población nueva.

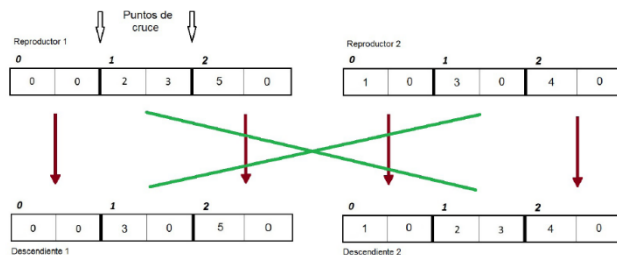


Figura 4: Cruce de 2 reproductores

Mutación. Este procedimiento se aplica después del cruzamiento, en cada individuo independientemente, en el paso 7

del algoritmo 1. Para el individuo seleccionado, según la probabilidad de mutación obtenida, se elige aleatoriamente una posición del vector para cambiar la ruta utilizada en dicha posición. Seleccionando una ruta de las disponibles para dicha posición, se tiene una probabilidad más alta de generar una solución factible.

Asignación de espectro. Un algoritmo de asignación de espectro se aplica a cada i -ésimo gen de forma consecutiva en el orden pre establecido por los índices en el cromosoma.

El algoritmo utilizado en este MOEA es el Random Fit, el cual asigna aleatoriamente el FS libre encontrado que cumpla con las restricciones del problema.

Luego se clasifica la población recién formada en categorías (ranqueo) según su relación de dominio, para luego seleccionar a los mejores con mejor rango, como se ve en los pasos 10 y 11 del algoritmo 1. Por lo tanto el algoritmo comienza todo de nuevo, desde la elección de reproductores, hasta que alcanza la condición de parada.

Criterio de parada. Se utiliza un tiempo máximo de ejecución como criterio de parada.

8 PRUEBAS EXPERIMENTALES Y RESULTADO.

9 CONCLUSIONES

REFERENCES

- [1] Joao HL Capucho, Leandro C Resendo: "ILP model and effective genetic algorithm for routing and spectrum allocation in elastic optical networks", *Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), 2013 SBMO/IEEE MTT-S International*, pp. 1–5, 2013.
- [2] Bijoy Chand Chatterjee, Nityananda Sarma, Eiji Oki: "Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: a tutorial", *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, pp. 1776–1800, 2015.
- [3] Konstantinos Christodouloupoulos, Ioannis Tomkos, EA Varvarigos: "Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks", *Journal of Lightwave Technology*, pp. 1354–1366, 2011.
- [4] Yue-Kai Huang, Ezra Ip, Tiejun J Xia, Glenn A Wellbrock, Ming-Fang Huang, Yoshiaki Aono, Tsutomu Tajima, Milorad Cvijetic: "Mixed line-rate transmission (112-Gb/s, 450-Gb/s, and 1.15-Tb/s) over 3560 km of field-installed fiber with filterless coherent receiver", *Lightwave Technology, Journal of*, pp. 609–617, 2012.
- [5] F. Ilchmann, others: "Efficient and optimized network architecture: Requirements and reference scenarios", *Deliverable D2*, 2011.
- [6] Abdullah Konak, David W Coit, Alice E Smith: "Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial", *Reliability Engineering & System Safety*, pp. 992–1007, 2006.
- [7] Biswanath Mukherjee: *Optical WDM networks*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [8] Nicola Sambo, Antonio D'Errico, Claudio Porzi, Valeria Vercesi, Muhammad Imran, Filippo Cugini, Antonella Bogoni, Luca Poti, Piero Castoldi: "Sliceable transponder architecture including multiwavelength source", *Journal of Optical Communications and Networking*, pp. 590–600, 2014.
- [9] Marcelo D Rodas-Brítez y Diego P Pinto-Roa. "Quality of protection on WDM networks: A quantitative paradigm based on recovery probability". En: *Computing Conference (CLEI), 2014 XL Latin American*. IEEE. 2014, pags. 1-11.
- [10] Ysapy Mimbi Ortiz, Carmelo Fretes y Diego P. Pinto. "Routing and Spectrum Allocation in Elastic Networks. An approach based on Multi-objective Evolutionary Algorithms". En: *5th International Conference on Engineering Optimization (ENGOPT)*. Federal University of Rio de Janeiro. 2016.
- [11] G Recommendation. 694.1: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid". En: *International Telecommunications Union*, Tech. Rep. (2012).
- [12] Fatai Zhang y col. "Requirements for GMPLS control of flexible grids". En: *IETF Internet Draft 1* (2011).
- [13] Ori Gerstel y col. "Elastic optical networking: A new dawn for the optical

- Layer". En: *IEEE Communications Magazine* 50.2 (2012).
- [14] Yang Wang, Xiaojun Cao y Yi Pan. "A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path networks". En: *INFO-COM, 2011 Proceedings IEEE*. IEEE. 2011, pages. 1503-1511.
 - [15] Dan Simon. *Evolutionary optimization algorithms: biologically-inspired and population-based approaches to computer intelligence*. Hoboken. 2013.
 - [16] D. T. Hai, "Multi-objective genetic algorithm for solving routing and spectrum assignment problem", *2017 Seventh International Conference on Information Science and Technology (ICIST)*, Da Nang, 2017, pp. 177-180. doi: 10.1109/ICIST.2017.7926753
 - [17] Prashant K Gupta y Pranab K Muhuri. "Multi-objective linguistic optimization: Extensions and new directions using 2-tuple fuzzy linguistic representation model". En: *Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), 2017 IEEE International Conference on*. IEEE. 2017, pages. 1-6.
 - [18] Goran Z Markovic. "Routing and spectrum allocation in elastic optical networks using bee colony optimization". En: *Photonic Network Communications* (2017), pages. 1-19.
 - [19] Miros law Klinkowski. "A genetic algorithm for solving RSA problem in elastic optical networks with dedicated path protection". En: *International Joint Conference CISIS'12-ICEUTE12-SOCO12 Special Sessions*. Springer. 2013, pages. 167-176.
 - [20] Feng Wang, Yuan Man y Lichun Man. "Intelligent optimization approach for the k shortest paths problem based on genetic algorithm". En: *Natural Computation (ICNC), 2014 10th International Conference on*. IEEE. 2014, pages. 219-224.
 - [21] Dao Thanh Hai y Kha Manh Hoang. "An ecient genetic algorithm approach for solving routing and spectrum assignment problem". En: *Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing (Sig-TelCom), International Conference on*. IEEE. 2017, pages. 187-192.
 - [22] Ying Wang y col. "ACO-based routing and spectrum allocation in flexible bandwidth networks". En: *Photonic Network Communications* 25.3 (2013), pages. 135-143.
 - [23] Roza Goscien, Miros law Klinkowski y Krzysztof Walkowiak. "A tabu search algorithm for routing and spectrum allocation in elastic optical networks". En: *Transparent Optical Networks (ICTON), 2014 16th International Conference on*. IEEE. 2014, pages. 1-4.
 - [24] Kostas Christodouloupoulos, Ioannis Tomkos y Emmanouel A Varvarigos. "Routing and spectrum allocation in OFDM-based optical networks with elastic bandwidth allocation". En: *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)*, 2010 IEEE. IEEE. 2010, pages. 1-6.