**Estudio de Algoritmos Evolutivos Multi Objetivos aplicado a RSA en redes EON**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 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 Assigment) 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. (Rounting and Spectrum Assigment) 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, lo 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 frecuency 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 ésto 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 divido en ranuras (frecuency 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 condicion 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 frecuency 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 éste 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 Y REDES OPTICAS ELASTICAS

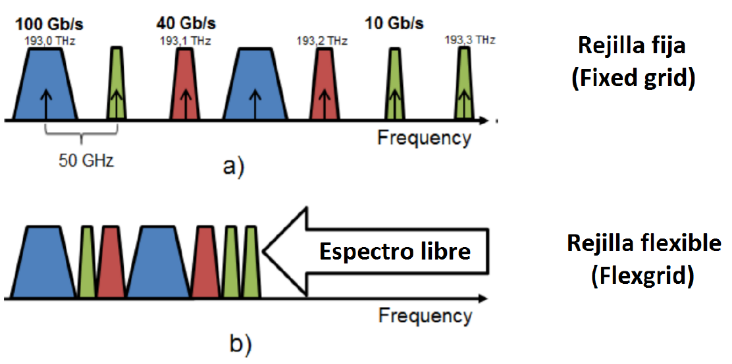
Una red consiste en la colección de nodos interconectados por enlaces. Estos enlaces requieren equipos de transmisión, mientras que los nodos requieren equipos de conmutación. Los distintos desarrollos e investigaciones tecnológicas han demostrado que la óptica es una de las mejores para la transmisión de señales, puesto que ésta puede amplificar simultáneamente múltiples señales de longitud de onda en un asola conexión de fibra.

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

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 (Frecuency Slots) de tamaños fijos de 6.25, 12.5, 25 y 50 GHz. [12] y además se asigna una frecuencia central (CF, Central Frecuency) a cada camino óptico elástico (EOP – Elastic Optical Path) que debe coincidir con el principio o el final de estas ranuras. En la figura 1 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 1: 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 ala 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].

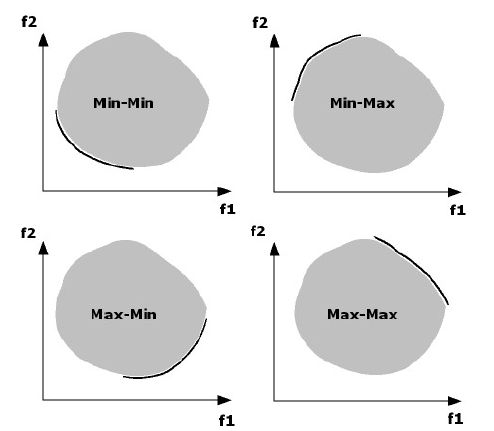
El problema de RSA en Redes Ópticas Elásticas es similar al problema de enrutamiento y asignación de longitudes de onda (RWA – Routing Wavelength Allocation) en redes basadas en WDM. La diferencia entre ambas (RSA y RWA) es la capacidad de asignar de manera flexible el espectro de frecuencia. El RSA es considerado un problema NP-Completo [14], y se clasifican en dos tipo: Online o Dinámico y Offine 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 Optimas, 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 2, 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 2: 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 [25], 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 el trabajo propuesto en [16] es la siguiente: hay dos objetivos asociados a cada cromosoma. El primer objetivo *f1,* es el ancho del espectro que indica el máximo slice indexado utilizado en la red. El segundo objetivo *f2* 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 y sin ningún tipo de ordenación, se actualiza el vector de disponibilidades de espectro de cada enlace.

En este trabajo desarrollado, 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] es un ordenamiento aleatorio.

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*sd), 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.

**6.1 Formulación MOILP**

Dados:

*G* : Grado de la red, que representa a una EON

*E* : Conjunto de enlaces, en G

*V* : Conjunto de vértices, en G

*GB* : Cantidad de FS para Banda Guarda

*Ftotal* : Cantidad de FS que posee la fibra

*P* : Conjunto de rutas

*K* : Cantidad de rutas disponibles

*SD* : Cantidad de demandas

Las notaciones y la formulación se presentan a continuación:

**Constantes:**

*dist\_max* : Distancia máxima recorrida considerando las rutas más largas.

*espectrum\_max* : Índice del máximo FS disponible.

*cost\_max* : Costo total de las solicitudes considerando sus distancias máximas.

: Distancia de la ruta p

αsd : Cantidad de FS solicitados por la solicitud sd donde s, d, ∈ V

Índices:

*sd* : Índice de emandas, *sd* *∈ {1, 2, …, SD}*

p : Índice de rutas, p ∈ {1, 2, …, SD}

*mn* : Índice de enlace direccional, m ≠ n

**Variables:**

: 1 si la ruta *p* es utilizada para atender la solicitud *sd*, en otro caso

*Λsd* : Primer FS asignado a la solicitud *sd, sd ∈ {0, …, Ftotal - 1}*

*Δsd, s’d’* : Indicador que es igual a 0 si *Λs’d’ < Λsd,* y 1 en caso contrario (es decir, *Λs’d’ < Λsd)*

Función objetivo a minimizar:

***f(x) = f1, f2, f3***

sujeto a:

* The Maximum Distance is:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

* The Maximum Spectrum:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |
|  |  |

* The cost is:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |
|  | (6) |
|  | (7) |
|  | (8) |
|  | (9) |

La restricción (1) representa la distancia recorrida, la restricción (2) representa el espectro máximo utilizado y la (3) representa el costo total.

Por otro lado, se tiene que, para todas las solitudes *sd, s’d’* y los caminos *p ∈ Psd* y *p’ ∈ Ps’d’* con *p y p’* compartiendo al menos un enlace común *mn* las restricciones (4), (5), (6), (7), (8) y (9) representa el costo total.

Las restricciones (4), (5) y (6) aseguran que las porciones de espectro que se asignan a las conexiones que utilizan caminos que comparten un enlace común no se superpongan y sean adyacentes.

Además, para todas las solicitudes *sd,s’d’* que tienen *p ∈ Ps’d’,* con *p* y *p’* compartiendo al menos un enlace común (∃ *mn : nm ∈ p ∧ mn ∈ p’)*, las restricciones (7), (8) y (9) aseguran que, o bien *δsd,s’d’ = 1* significa que la frecuencia inicial *Λsd* es más pequeña que la frecuencia inicial *Λsd* es más pequeña que la frecuencia inicial *Λsd,* esto es, *Λsd < Λs’d’,* o *δs’d’,sd = 1,* en cuyo caso *Λsd > Λsd* . Note que *Λsd* y *Λsd* son siempre acotados superiormente por *Ftotal*, y que por lo tanto su diferencia será siempre menor que *Ftotal.*

7 IMPLEMENTACION DEL NSGA II

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 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 NSGAII 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:** frentePareto  1: InicializarPoblacion(P)  2: **mientras** No se cumple el criterio de parada hacer  3: Q = generarHijos(P) mediante selección, cruzamiento  y mutacion  4: Q = Q ∪ P  5: R = Construir el frente de pareto a partir de Q basado  en la dominancia  6: Build Pareto fronts (R)  7: Calcular Distancia de Crowding (R)  8: P = [0]  9: **mientras** P < tamañoPoblacion  10: Include the solution in population P  11: **Fin mientras**  12: **retornar** frentePareto(P) |

|  |
| --- |
| **Algoritmo 2** Evaluación de población |
| **ENTRADA:** Población P  **SALIDA:** Población evaluada  1: **para** cada *Individuo* ∈ ***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 f1; Espectro f2, Costo f3  1: Distancia = 0  2: FSMayor = 0  3: **para** *Gen* ∈ *Individuo* **hacer**  4: Distancia = Distancia + DistanciaRuta(Gen, P)  5: si FSMayor ≤ UltimoFS(Gen) entonces  6: FSMayor = UltimoFS(Gen)  7: **fin si**  8: Costo = Costo + Costo(Gen, P)  9: fin para  10: f1 = Distancia / Distancia Máxima  11: f2 = FSMayor / FS Máximo  12: f3 = Costo / Costo Máximo  13: **retorna** f1, f2, f3 |

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.

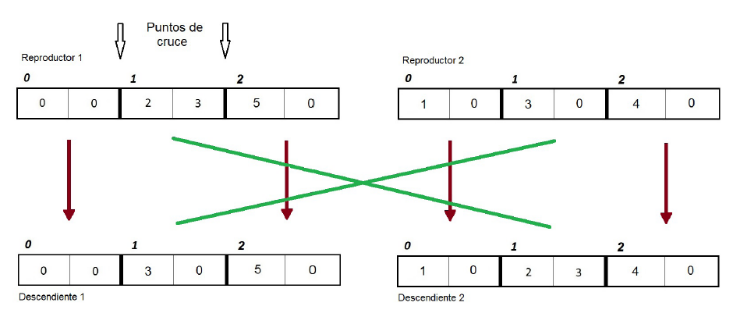
**Selección de cromosomas para la siguiente generación.** El algoritmo NSGA II nos muestra que el ciclo inicia con la selección de individuos, en el paso 3. Se utiliza el método de muestreo estocástico universal para seleccionar dos padres para producir nuevos individuos para la próxima generación [17]

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 NSGA II y determinará en gran medida la evolución de la población; esto se aplica en el paso 3, 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 3, 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 3: Cruce de 2 reproductores**

**Mutación.** Este procedimiento se aplica después del cruzamiento, en cada individuo independientemente, en el paso 3 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.

**Dominancia de pareto.** En el paso 4 se realiza la unión de las dos poblaciones Q = Q ∪ P, en el paso 5 y 6 la población se clasifica en categorías (rankeo) 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).

Luego se clasifica la población recién formada en categorías (rankeo) según su relación de dominio, para luego, como dice el paso 7, calcular la Distancia de Crowding de cada individuo, para luego seleccionar a los mejores en el siguiente ciclo que empieza en el paso 8, se seleccionan los individuos con mejor rango y distancia de crowding hasta llenar el tamaño de la población, como se ve en los pasos 9, 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.

En esta sección presentamos la diferencia con el trabajo propuesto en [16] y el trabajo presentado por nosotros, además se presentan y se analizan los resultados de las pruebas experimentales.

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 el trabajo propuesto en [16] es la siguiente: hay dos objetivos asociados a cada cromosoma. El primer objetivo f1, es el ancho del espectro que indica el máximo slice indexado utilizado en la red. El segundo objetivo f2 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 y sin ningún tipo de ordenación, se actualiza el vector de disponibilidades de espectro de cada enlace.

En este trabajo desarrollado, 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] es un ordenamiento aleatorio.

Las pruebas realizadas considerando distintos tipos de carga de tráfico, sobre la topología NSF, distintos valores *K* (caminos) y distintas cantidades de demandas, intentar replicar diversos escenarios posibles del problema a resolver. Las pruebas experimentales realizadas, demuestran que nuestra propuesta de ordenación para el atendimiento de las solicitudes presenta resultados promisorios.

**8.1 Ambiente de pruebas**

Los experimentos fueron realizados en una computadora con procesador Intel Core i3 (3.40 GHz) y 8 GB de memoria RAM. La implementación y ejecución del MOEA fueron realizadas con JAVA 8.

Todas las ejecuciones fueron ejecutadas con la topología NSF de 14 nodos que se puede observar en la figura 4.

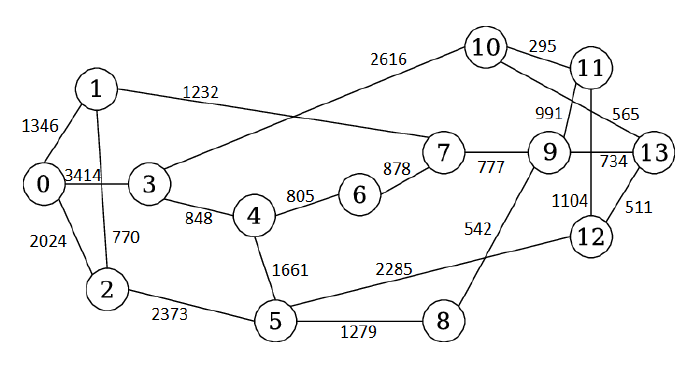


Figura 4: Topología de red NSF de 14 nodos con distancia en Kilómetros

Las cargas de tráfico utilizadas fueron del tipo all-to-all, es decir, cada nodo de la red realiza una solicitud de transferencia a todos los demás de la red. Además, el tipo de carga de tráfico fue aleatoria. Las cargas se dividen en 4 categorías, 50, 100 y 150 (baja, media, alta), es decir que para la categoría de 50 FS, para cada demanda se generó un valor aleatorio entre 1 y 50 com ocantidad solicitada de FS; para la categoría 100, para cada demanda se generó un valor aleatorio entre 1 y 100 como cantidad solicitada de FS y para la categoría 150, se generó un valor aleatorio de 1 y 150 como cantidad solicitada de FS.

Otra variante que se tuvo en cuenta para la ejecución de las pruebas fue la cantidad de rutas más cortas precalculadas, es decir, el valor *k*. Fueron hechas con los siguientes valores de *k* = 2, 3, 4 y 5 para la topología NSF.

Para las ejecuciones del MOGA, fueron utilizados los valores mostrados en la tabla 1 como parámetros evolutivos.

La métrica utilizada para la comparación de los algoritmos es de hypervolúmen y cobertura.

**Table 1:** Parámetros utilizados para la ejecución del MOGA

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Parámetro** | | **Valor** |
| Tamaño de la población | 50 | |
| Probabilidad de mutación | 0.1 | |
| Criterio de Parada (en minutos) | 5 | |
| Cantidad de corridas independiente | 15 | |

Basado en estos pasos se presentan los resultados experimentales.

9 CONCLUSIONS Y TRABAJOS FUTUROS

De acuerdo a los resultados expuestos podemos concluir que nuestro algoritmo con ordenación obtiene mejores Frentes de Pareto, con respecto al algoritmo sin ordenación. Así mismo concluimos que si damos un tratamiento a la tabla de solicitudes ordenándolos de mayor a menor, definido por el mayor costo posible de dicha solicitud, y dividimos la tabla de solicitudes en dos grupos, un grupo atendimiento de mayores y otro grupo de atendimiento aleatorio, obtenemos mejores Frentes de Pareto.

Como futuros trabajos a desarrollar podemos mencionar que la misma prueba se pueda realizar sobre las distintas topologías de red existentes para corroborar el comportamiento del algoritmo. Así también se pueden realizar pruebas de las distintas asignaciones de espectro del RSA en las distintas topologías, para determinar cuál asignación de espectro tiene una mejor performance.

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 Christodoulopoulos, 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 Potı̀, 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 fexible 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, pags. 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, pags. 1-6. |
| [18] | Goran Z Markovic. “Routing and spectrum allocation in elastic optical networks using bee colony optimization”. En: *Photonic Network Communications* (2017), pags. 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, pags. 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, pags. 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, pags. 187-192. |
| [22] | Ying Wang y col. “ACO-based routing and spectrum allocation in fexible bandwidth networks”. En: *Photonic Network Communications* 25.3 (2013), pags. 135-143. |
| [23] | Roza Goscien, Miroslaw Klinkowski y KrzysztofWalkowiak. “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, pags. 1-4. |
| [24] | Kostas Christodoulopoulos, 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, pags. 1-6. |
| [25] | Guoying Zhang, Marc De Leenheer y Biswanath Mukherjee. “Optical traffic grooming in OFDM-based elastic optical networks”. En: *Journal of Optical Communications and Networking* 4.11 (2012), B17-B25. |