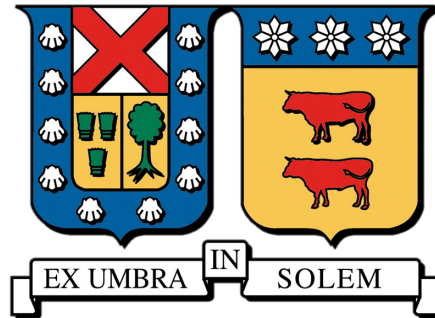


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA**  
**VALPARAÍSO - CHILE**



**“DISEÑO HEURÍSTICO PARA SOLUCIONAR EL  
PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO Y ASIGNACIÓN  
DE ESPECTRO EN REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS  
ESTÁTICAS CON TOPOLOGÍA DE ANILLO”**

**JESENIA FRANCISCA SALAZAR NAVARRO**

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
CIVIL TELEMÁTICO**

**PROFESOR GUÍA:**

**NICOLÁS JARA**

**PROFESOR CORREFERENTE:**

**REINALDO VALLEJOS**

**FEBRERO 2019**



# Agradecimientos

A los que de una u otra forma me han acompañado estos 9 años. Si los nombro sería imposible que no me faltara alguno, gracias por los abrazos, las risas y las palabras de aliento, esos pequeños detalles significan mucho.

A Nicholas Bernal, que escribió por mi cuando mis manos no pudieron, tienes una voluntad de oro, gracias por todo.

A los más apañadores: Fernanda Mateo, Nicolás Castro y Nicolás Valenzuela, gracias por el apoyo, el cariño, los retos y por ayudarme de distintas maneras, son grandes personas, gracias totales.

A mi familia, por darme la libertad de elegir y por formar a la persona que soy hoy, no habría llegado hasta acá si no fuera por ellos.

A mi profesor guía, Nicolás Jara, gracias infinitas por hacer esto posible, por la paciencia, la preocupación y por enseñarme todo lo que contiene esta memoria.

*Puedes ser lo que quieras, solo conviértete en lo que crees que podrías ser.*

*Freddie Mercury*



## Resumen

En este trabajo de título se proponen dos métodos heurísticos para resolver el problema de enrutamiento y asignación de espectro en redes ópticas elásticas con topología de anillo. Los modelos presentados se basan en la incidencia del ordenamiento de los usuarios en los resultados de fragmentación y costo de la red.

La idea fundamental, que es compartida por los dos modelos desarrollados en este trabajo de título, es el concepto “*Spiral*” que consiste en la asignación correlativa de usuarios en espiral, siguiendo la topología de anillo. Esta forma de asignación es el elemento diferenciador de las heurísticas expuestas en esta memoria.

Previo a la aplicación de la asignación *Spiral* se clasifica a los usuarios según sus características de requerimiento de ancho de banda y largo de ruta. Esto se aplica con distintas prioridades, en el primer método se divide a los usuarios en subconjuntos según su requerimiento de ancho de banda para luego ordenar cada uno de estos subconjuntos de forma decreciente de acuerdo al largo de su ruta, por el contrario, el segundo método forma subconjuntos según el largo de ruta para luego ordenarlos de forma decreciente según su requerimiento de ancho de banda. Cabe destacar que la ruta correspondiente a cada usuario es calculada previamente en la etapa de enrutamiento, esta ruta es fija y está dada por el camino más corto entre los nodos origen y destino.

A modo de validar las heurísticas propuestas, estas son comparadas con los resultados obtenidos tanto por métodos de optimización en el caso de redes pequeñas, como con los métodos más eficientes de la literatura para redes de  $N$  nodos.

***keywords: Elastic Optical Networks, Routing and Spectrum Allocation, ring topology, fragmentation***

## **Abstract**

In this paper, two heuristic methods are proposed to solve the problem of routing and spectrum allocation in elastic optical networks with a ring topology. The presented models based their proposals on the incidence of the users ordering in the results of fragmentation and network cost.

The fundamental idea, shared by the two models developed in this work, is the Spiral concept that consists of the correlative assignment of spiral users, following the ring topology. This assignment method is the essential element of the heuristics presented in this report.

Previous to the application of the Spiral assignment, the proposed methods classify users according to their characteristics of bandwidth requirements and route length. In the first method, the users are divided into subsets according to their bandwidth requirement and then ordering each of these subsets in a decreasing manner according to their route length, on the contrary, the second method creates subsets according to the route length and then orders them according to their bandwidth requirements. Heed that the route corresponding to each user is fixed and is the shortest path between the origin and destination nodes.

To validate the proposed heuristics, are compared with the results obtained both by optimization in case of small networks and with the most efficient methods of the literature for N-node networks.



## Glosario

**Fragmentación:** Existencia de porciones de espectro de frecuencia inutilizadas en la red.

**Frequency Slot Unit:** Unidad definida como el valor mínimo de asignación de ancho espectral de frecuencia, definido típicamente con el valor de 12,5[GHz].

**Heurística:** Técnica de indagación y descubrimiento, manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos como reglas empíricas.

**Integer Linear Programming:** Programación Lineal Entera, es un método que utiliza expresiones matemáticas para resolver problemas de optimización.

**Metaheurística:** Técnicas heurísticas de aplicación general, que operan bajo ciertos parámetros definidos por el usuario ajustables a los problemas específicos.

## Acrónimos

**DB-FF:** Decreasing Bandwith First Fit

**DB-SFF:** Decreasing Bandwith-Length Spiral First Fit

**DL-FF:** Decreasing Length First Fit

**DL-SFF:** Decreasing Length-Bandwith Spiral First Fit

**EON:** Elastic Optical Networks

**FF:** First Fit

**FSU:** Frequency Slot Unit

**ILP:** Integer Linear Programming

**ITU:** International Telecommunication Union

**RSA:** Routing and Spectrum Allocation

**RWA:** Routing and Wavelength Assignment

**SP-OA:** Shortest Path Optimal Assignment

**WDM:** Wavelength Division Multiplexing

# Índice de figuras

2.1. Concepto de multiplexación por longitudes de onda . . . . .	12
2.2. Espectro con canales de 50[GHz] . . . . .	12
2.3. Redes Estáticas vs Dinámicas . . . . .	14
2.4. Comparación entre uso de espectro con malla fija y malla elástica . . .	16
4.1. Idea de orden de asignación . . . . .	26
4.2. Diagrama de flujo de la estrategia de enrutamiento . . . . .	28
4.3. Diagrama de Flujo DB-SFF . . . . .	30
4.4. Diagrama de Flujo DL-SFF . . . . .	33
5.1. Ejemplo de resultado de asignación de espectro para un anillo de 5 nodos.	36
5.2. Costo Total Según Número de Nodos de la Red . . . . .	44
5.3. Mejora Porcentual del Costo Total comparado con DB-FF . . . . .	45
5.4. Mejora Porcentual del Costo Total comparado DL-FF . . . . .	46
5.5. Número de FSU Fragmentados Según Número de Nodos de la Red . . .	48
5.6. Fragmentación Relativa al Costo, comparación de algoritmos propues- tos con DB-FF . . . . .	49
5.7. Fragmentación Relativa al Costo, comparación de algoritmos propues- tos con DL-FF . . . . .	50



# Índice de cuadros

5.1. Comparación de los métodos propuestos con lo expuesto en [1] para redes con requerimientos de ancho de banda proporcionales al largo de la ruta . . . . .	39
5.2. Comparación de los métodos propuestos con lo expuesto en [1] para redes con requerimientos de ancho de banda inversamente proporcionales al largo de la ruta . . . . .	41
5.3. Mejora promedio porcentual del costo total respecto a DB-FF . . . . .	47
5.4. Mejora promedio porcentual del costo total respecto a DL-FF . . . . .	47
5.5. Resultados FRC Promedio por Algoritmo . . . . .	51



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>5</b>
1.1. Objetivos . . . . .	8
1.1.1. Objetivo General . . . . .	8
1.1.2. Objetivos Específicos . . . . .	8
1.2. Estructura . . . . .	8
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>11</b>
2.1. Redes Ópticas WDM . . . . .	11
2.1.1. Asignación de recursos . . . . .	13
2.2. Redes Ópticas Elásticas . . . . .	15
2.2.1. Asignación de Recursos . . . . .	17
<b>3. Estado del Arte</b>	<b>19</b>
3.1. Soluciones Basadas en Optimización . . . . .	19
3.2. Soluciones Basadas en Modelos Heurísticos . . . . .	20
3.2.1. Enrutamiento . . . . .	21
3.2.2. Asignación de Espectro . . . . .	21
3.2.3. Orden de asignación de Recursos . . . . .	23
<b>4. Modelos Propuestos</b>	<b>25</b>
4.1. Idea General . . . . .	25
4.2. Modelos Heurísticos . . . . .	26

4.2.1.	Estrategia de Enrutamiento . . . . .	27
4.2.2.	Modelo Propuesto: Decreasing Bandwidth-Length Spiral First Fit (DB-SFF) . . . . .	29
4.2.3.	Modelo Propuesto: Decreasing Length-Bandwidth Spiral First Fit (DL-SFF) . . . . .	32
<b>5.</b>	<b>Resultados</b>	<b>35</b>
5.1.	Métricas de Comparación . . . . .	35
5.1.1.	Costo Total de la Red . . . . .	36
5.1.2.	Fragmentación Relativa al Costo . . . . .	36
5.2.	Comparación con Modelo de Optimización . . . . .	37
5.3.	Comparación Modelos Heurísticos . . . . .	43
5.3.1.	Costo Total de la Red . . . . .	44
5.3.2.	Fragmentación Relativa al Costo . . . . .	48
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>53</b>

# Capítulo 1

## Introducción

En la industria de las telecomunicaciones es conocido que la demanda de tráfico de red crece rápida e incesantemente con incrementos típicamente por sobre el 30 % anual [2], lo que según las proyecciones llevarán a que para el año 2022 la demanda sea de 396 Exabytes por mes[3]. Basados en estas cifras, se puede observar que la demanda de tráfico de red se duplica cada 2 o 3 años.

En la actualidad, las redes han podido satisfacer esta creciente demanda. Sin embargo, investigadores han reconocido un potencial colapso de capacidades en las redes de telecomunicaciones, principalmente en las redes de fibra óptica. El *Capacity Crunch* es un concepto que se refiere a la inhabilidad de la infraestructura de red actual para responder a los requerimientos de ancho de banda de los usuarios. Se estima que a la tasa de crecimiento actual de la demanda, el Capacity Crunch se alcanzaría en la próxima década [4]. Dada la necesidad de responder a la demanda de los usuarios y dar una solución a este problema es que se hace imperativo buscar soluciones tecnológicas que nos lleven a un uso más eficiente de la infraestructura actual.

Hoy en día en las redes de fibra óptica se utiliza la tecnología de multiplexación por longitud de onda (en inglés, Wavelength Division Multiplexing - WDM), donde

se transmite múltiples señales por la misma fibra utilizando distintas longitudes de onda dentro de una grilla preestablecida de longitudes de onda separadas por 50 [GHz], estandar definido por la International Telecommunications Union (ITU). Utilizando esta tecnología, nace primeramente el problema de *enrutamiento y asignación de longitudes de onda* (RWA) donde se debe conectar a todos los usuarios considerando como restricciones: cada canal alberga solo una conexión y la longitud de onda asignada se debe mantener en toda la ruta origen destino.

Sin embargo, la operación actual de las redes ópticas es ineficiente por varias razones. Una de ellas es que a cada usuario se le asigna una longitud de onda asociada a una porción espectral de un ancho fijo, ofreciendo a todos los usuarios una porción espectral del mismo tamaño independiente de sus necesidades espectrales reales. Esta definición fija de cada canal de comunicación genera complicaciones técnicas especialmente cuando se requiere transmitir altas tasas de transmisión (superiores a 100[Gb/s]). Por ejemplo, los formatos estándar para transmitir tráfico sobre 100[Gb/s] requieren un ancho espectral mayor a 50[GHz] [1]. De hecho, para forzar la operación de la red sobre canales de 50[GHz], incluso considerando formatos de modulación con alta eficiencia espectral, permite solo transmisiones de corta distancia. Más aún, los proveedores de servicios de internet requieren aumentar la tasa de transmisión para satisfacer el vertiginoso crecimiento de demanda de ancho de banda.

Para dar solución a este problema, y hacer un uso más eficiente del espectro nace un nuevo paradigma de red denominado Redes Ópticas Elásticas (EON por sus siglas en inglés), capaces de asignar espectro a los usuarios en función de sus requisitos de ancho de banda, esto se logra mediante una disminución de la granularidad del espectro, el que es dividido en una nueva unidad de frecuencia, típicamente de 12,5[GHz], llamadas Frequency Slot Unit (FSU). Se asigna a cada usuario un número entero de FSU contiguos acorde a su requerimiento de ancho de banda.

Para entrar en detalles, el diseño de redes ópticas es un tema central en el ámbito industrial y académico. En particular, el diseño de redes ópticas se descompone en muchas tareas, donde los ingenieros deben básicamente organizar la forma en como los recursos son utilizados por sus usuarios. Uno de estas tareas consiste en asignar una ruta y una porción del espectro de frecuencia a cada usuario. Este problema, en el área de redes ópticas elásticas, es conocido como *enrutamiento y asignación de espectro* (RSA).

En consecuencia, este trabajo de título se enfoca en resolver el problema de enrutamiento y asignación de espectro para topologías de tipo anillo, para esto se diseñan dos metodologías bajo una perspectiva heurística basada en la incidencia del orden de asignación de recursos en los resultados de eficiencia espectral de la red. Los dos modelos que se proponen en este trabajo utilizan como estrategia de enrutamiento la ruta más corta y para la asignación de espectro, además de utilizar la política First Fit, un concepto “*Spiral*”, que básicamente busca asignar los recursos siguiendo la topología de la red. Como en el contexto de este trabajo de título se trabaja con topologías de anillo, lo que busca Spiral es asignar los recursos a los usuarios en un orden tal que se forme un espiral o anillos concéntricos.

Lo que diferencia los métodos propuestos, es que previo a la asignación Spiral los usuarios son clasificados según sus características. El primer método clasifica a los usuarios según sus requerimientos de ancho de banda para luego ordenarlos según el largo de su ruta previamente asignada, por otra parte, el segundo método clasifica a los usuarios según el largo de su ruta para luego ordenarlos según sus requerimientos de ancho de banda.

Finalmente, se compara los resultados obtenidos por los métodos propuestos, con los alcanzados mediante modelos de optimización y los dos mejores métodos mencionados en la literatura, con el fin de evaluar los beneficios de la aplicación de las

heurísticas desarrolladas en este trabajo de título.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo General**

El objetivo de este trabajo consiste en diseñar, implementar y hacer un análisis comparativo de heurísticas para solucionar el problema de enrutamiento y asignación de espectro en redes ópticas elásticas con topología de anillo. El análisis comparativo incluye trabajos anteriores que resolvieron el problema desde una perspectiva de optimización y los mejores métodos heurísticos incluidos en la literatura.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Revisar los métodos propuestos en la literatura.
- Diseño de propuestas de solución.
- Implementación de las propuestas de solución.
- Definición de métricas de comparación.
- Implementación de los métodos con mejores resultados de la literatura.
- Evaluar el desempeño de los métodos propuestos mediante la comparación de las implementaciones realizaads respecto de las métricas definidas.

## **1.2. Estructura**

Este documento se estructura de la siguiente forma: En el capítulo 2 se hace una revisión del funcionamiento actual de las redes de fibra óptica, el nacimiento de las redes

elásticas y sus respectivos problemas de asignación de recursos; en el capítulo 3 se presenta los trabajos más importantes de la literatura respecto al problema de enrutamiento y asignación de espectro para redes elásticas (RSA). En el capítulo 4 se presentan dos modelos heurísticos como propuesta de solución al problema RSA para topologías de anillo y se muestra detalles de cada uno de los modelos implementados mientras que en el capítulo 5 se recopila los resultados de la ejecución de dichos modelos. Por último, en el capítulo 6 se entregan las conclusiones del desarrollo de este proyecto.



# Capítulo 2

## Marco Teórico

En la década de los 80, los operadores de red comenzaron a migrar la capa física de las redes entre ciudades a cables de fibra óptica. Las redes ópticas están compuestas por cables de fibra de vidrio que transportan señales lumínicas con la información de los usuarios, la capacidad de este tipo de redes está fuertemente ligada a los desarrollos tecnológicos en el manejo de señales lumínicas y la teoría asociada a estas. El primer avance tecnológico, y el de mayor impacto, fue la capacidad de transportar señales ópticas en un mismo cable de fibra, lo que se denomina multiplexación por longitudes de onda (WDM por sus siglas en inglés).

### 2.1. Redes Ópticas WDM

La tecnología WDM o multiplexación por longitudes de onda es una técnica que busca aprovechar los recursos conectando a distintos usuarios a través de una sola fibra, esto se hace enviando la información de cada uno de ellos a distintas frecuencias (longitudes de onda) como se muestra en la figura 2.1. Se puede decir que WDM crea *fibras virtuales* en las que cada una sirve a un usuario diferente. El nacimiento de esta tecnología resultó en un aumento significativo de la capacidad de las redes, contemplando en sus inicios, menos de diez longitudes de onda por fibra y superando en la actualidad, los cien usuarios por enlace físico.

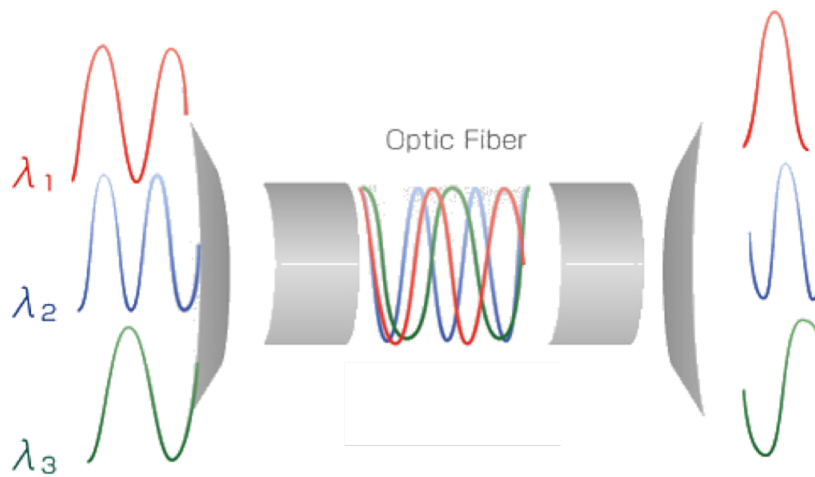


Figura 2.1: Concepto de multiplexación por longitudes de onda

Cada una de estas longitudes de onda o canales de comunicación introducidos en la fibra cuenta con una porción del espectro de frecuencia de ancho 50[GHz] definido según la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) en su norma ITU-T G.694.1 [5], la cual permite alcanzar una tasa de transmisión de 100[Gbps]. Un esquema de esta distribución de canales de ancho fijo se muestra en la figura 2.2.

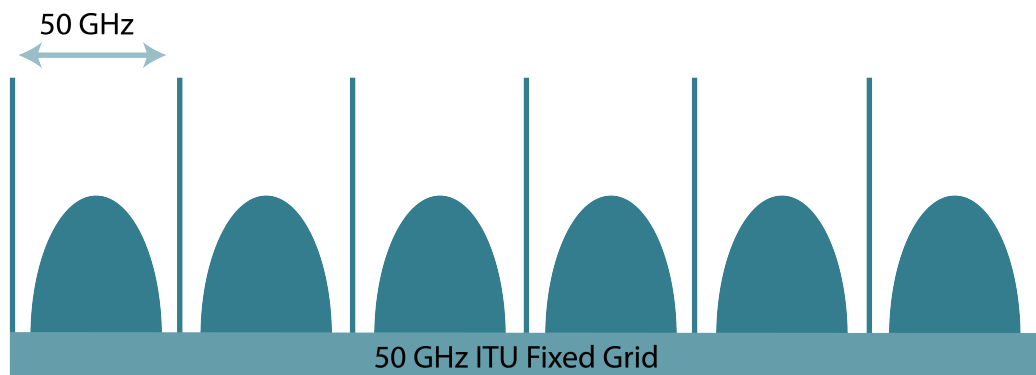


Figura 2.2: Espectro con canales de 50[GHz]

Bajo este esquema en que se tiene múltiples canales a disposición, es relevante hacer un uso eficiente de esta capacidad y contar con una metodología de asignación de recursos a los usuarios.

### 2.1.1. Asignación de recursos

#### Routing and Wavelength Assignment

Teniendo en cuenta que el principal objetivo es maximizar el rendimiento de la infraestructura de red, es de gran relevancia el como se asignan estos recursos. El problema de enrutamiento y asignación de longitudes de onda (RWA por sus siglas en inglés) corresponde a un problema esencial en el diseño de redes WDM.

El resolver el problema RWA implica asignar una ruta y una longitud de onda para cada conexión (usuario) de la red minimizando los recursos necesarios o, visto de otra manera, considerando los recursos de los que se dispone, maximizar el número de conexiones que se puede establecer con dichos recursos.

Asignar una ruta y longitud de onda para un usuario, implica escoger un camino óptico entre los nodos de origen y destino (*ruta*) y determinar la frecuencia (*longitud de onda*) o porción espectral que utilizará ese usuario para transmitir su información de origen a destino.

Existen dos restricciones tecnológicas a ser consideradas en la resolución de este problema

1. Cada canal alberga solo un usuario simultáneamente.
2. Dado que no existe conversión de longitud de onda, la longitud de onda asignada a dicha conexión debe mantenerse a lo largo de toda la ruta origen-destino.

La asignación de recursos, y por consiguiente la resolución del problema RWA, dependerá del modo de operación de la red.

## Modos de Operación

Según el comportamiento de los requerimientos de ancho de banda por parte de los usuarios y consecuentemente el funcionamiento de la red, es que las mismas se pueden clasificar en redes dinámicas o estáticas.

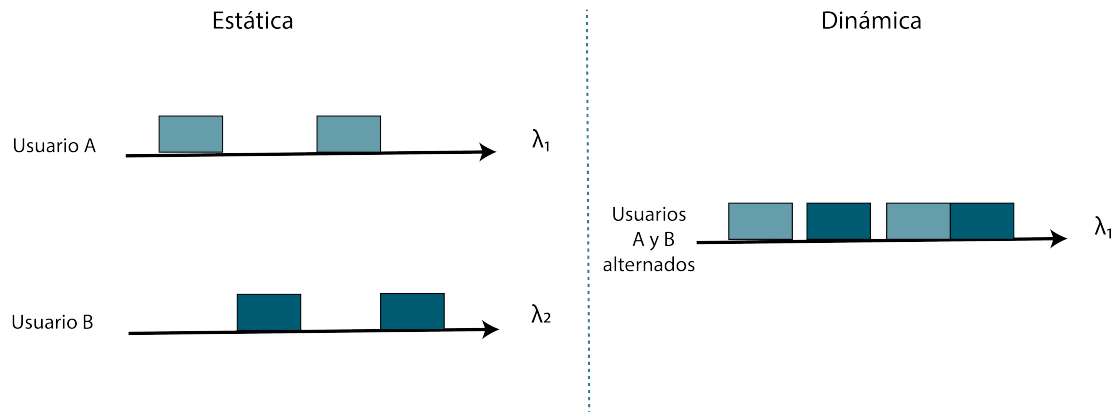


Figura 2.3: Redes Estáticas vs Dinámicas

### Redes estáticas

En este tipo de redes los usuarios tienen los recursos asignados a ellos de antemano y disponibles el 100% del tiempo, en redes de tipo estático es necesario conocer los requerimientos de ancho de banda de los usuarios con antelación y que estos requerimientos se mantengan relativamente estables en el tiempo.

En redes estáticas, cuando se resuelve el problema de enrutamiento y asignación de longitudes de onda los resultados se mantienen en el tiempo.

### Redes dinámicas

En las redes estáticas se puede observar un uso potencialmente ineficiente de los recursos, dado que los usuarios hacen uso de la red una parte y no el 100% del tiempo,

y el tiempo restante los recursos permanecen ociosos. Otra forma de utilizar los recursos es asignarlos cuando son requeridos por un usuario y luego de que este termina de utilizarlos, liberarlos para que puedan ser utilizados por otro usuario, de modo que una misma longitud de onda pueda ser utilizada por más de un usuario, siempre y cuando los usuarios no quieran transmitir de forma simultánea, esto se ilustra en la figura 2.3.

## 2.2. Redes Ópticas Elásticas

Además del aumento en la capacidad de las redes producido por la tecnología WDM, otra característica que produjo un incremento en la capacidad fue el aumento de la tasa de transmisión máxima que puede alcanzar cada longitud de onda. Esta tasa, que a mediados de los 90 rondaba los 2.5[Gbps], ha aumentado hasta llegar a 100[Gbps], que es la tasa máxima permitida por los 50[GHz] definidos por la ITU. Sin embargo, en la actualidad es posible encontrar usuarios que requieren de una mayor tasa de transmisión y en consecuencia de un mayor ancho espectral. Para satisfacer la demanda de dichos usuarios, se debe utilizar más de una longitud de onda, lo que introduce complicaciones técnicas asociadas a la multiplexación y demultiplexación de la señal original.

Adicionalmente, otro problema que se manifiesta bajo el esquema de canales de ancho fijo, es el desperdicio de porciones espectrales al asignar 50[GHz] a usuarios con necesidades espectrales menores al ancho del canal. En estos casos se advierte un uso ineficiente del espectro dado que se asigna a todos los usuarios la misma cantidad de recursos sean estos utilizados en su totalidad o de forma parcial. Un ejemplo de esto se observa en la figura 2.4.

Como una forma de dar solución a los problemas presentados es que nacen las redes elásticas, este tipo de redes busca asignar espectro a los usuarios en función de sus

requisitos de ancho de banda. Para hacerlo, divide el espectro en canales más pequeños de 12,5 [GHz], unidad a la que se le llama Frequency Slot Unit (FSU) y que permite disminuir la granularidad y agrupar porciones espectrales flexiblemente a la hora de asignar recursos a los usuarios y hacer un mejor uso del espectro, lo que se ilustra en la figura 2.4.

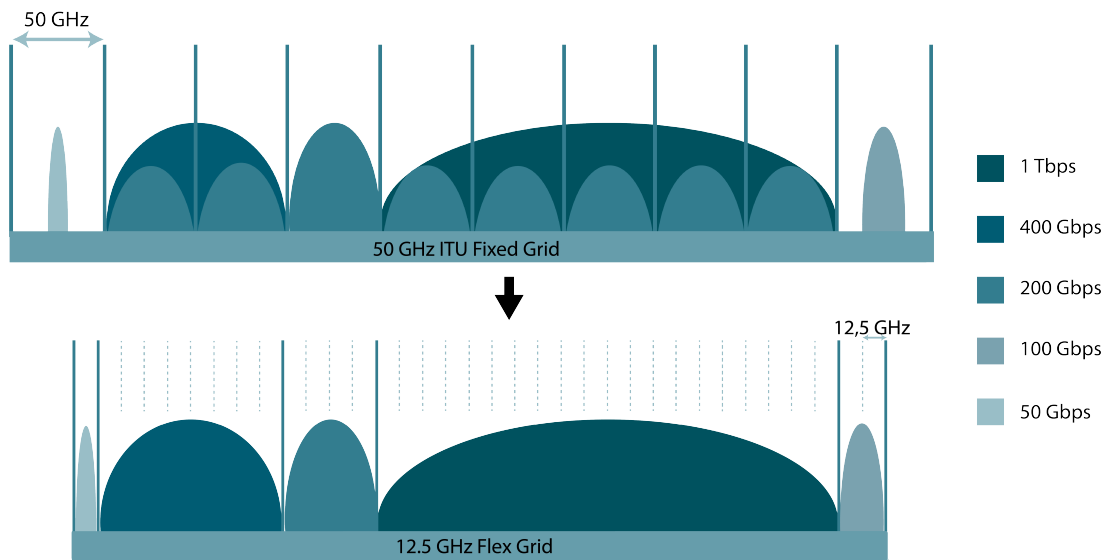


Figura 2.4: Comparación entre uso de espectro con malla fija y malla elástica

Además de la división y asignación flexible del espectro, el desarrollo de las redes elásticas es posible gracias al desarrollo de transceptores con capacidad de transmitir un bitrate variable, es decir, utilizar porciones variables de espectro.

En definitiva, las redes elásticas introducen a las redes las siguientes características:

1. Capacidad de transmitir tráfico a tasas superiores a los 100[Gbps] sin necesidad de multiplexación.
2. Utilización de porciones espectrales menores a 50[GHz] ajustadas a necesidades reales.
3. Capacidad de satisfacer demandas de tráfico variable.

### **2.2.1. Asignación de Recursos**

Análogamente a lo ocurrido con las redes de malla fija, en el caso de redes elásticas nuevamente se presenta el problema de asignación de recursos y para este nuevo tipo de redes corresponde al problema de enrutamiento y asignación de espectro (RSA por sus siglas en inglés).

#### **Routing and Spectrum Allocation**

El problema RSA, consiste en encontrar un camino óptico entre los nodos de origen y destino con espectro disponible acorde a la demanda de cada conexión para cada uno de los usuarios de la red, similar a lo ocurrido con RWA. Esta asignación está sujeta a las siguientes restricciones:

1. Cada canal alberga solo una conexión simultáneamente.
2. Los FSU asignados a dicha conexión deben mantenerse a lo largo de toda la ruta origen-destino.
3. En caso de que los requerimientos de ancho de banda del usuario deban ser satisfechos por más de un FSU, estos deben contiguos en el espectro.

El problema RSA es un problema de complejidad NP completa [2] y es un problema fundamental para el diseño de redes elásticas tanto estáticas como dinámicas, por este motivo es importante desarrollar métodos para resolverlo de forma eficiente para casos de redes reales.



# Capítulo 3

## Estado del Arte

En el capítulo anterior se ha descrito en que consiste el problema de enrutamiento y asignación de espectro de frecuencia, y se ha cubierto los conceptos básicos para comprender el tema que aborda este trabajo. En este capítulo, se expone los principales trabajos desarrollados para resolver el problema RSA para redes estáticas y algunas heurísticas heredadas del problema RWA y que aplican también en el escenario elástico.

### 3.1. Soluciones Basadas en Optimización

Considerando que el problema que se busca resolver tiene como objetivo minimizar el costo de la red, parece natural diseñar una solución desde la perspectiva de optimización.

Se ha propuesto una variedad de soluciones bajo la perspectiva de optimización mediante modelos de programación lineal entera (ILP), Mixed ILP (MILP) y metaheurísticas que abordan distintas variantes del problema, sin embargo, este enfoque resulta en modelos con miles o millones de variables, lo que trae como consecuencias problemas de escalabilidad e incapacidad para resolver el problema en un tiempo razonable para las redes encontradas en la práctica. La dificultad de este tipo de modelos es amplia-

mente mencionada en la literatura por López y Velazco (2016) [2], Wang et al. (2012) [6], Simmons (2014) [7] y Talebi et al. (2014) [8].

Meza et al. (2017) [1] proponen dos modelos desde la perspectiva de optimización para redes con topología de anillo, un modelo ILP puro que busca solucionar el problema conjuntamente (*One Step Approach*) y un modelo que dos pasos (*Two Step Approach*) llamado Shortest Path Optimal Assignment (SP-OA), este último utiliza una heurística de camino más corto para el resolver la asignación de rutas y un modelo ILP para la asignación de espectro. Ambos modelos mostraron las dificultades expuestas en el párrafo anterior, donde el modelo ILP puro fue capaz de entregar resultados para redes de hasta 8 nodos y el SP-OA completó su ejecución para hasta 9 nodos, siendo detenido en una red de 10 nodos a las 6 horas sin finalizar su ejecución.

Lo anterior hace necesario el desarrollo de heurísticas que permitan obtener soluciones cercanas al óptimo, pero que sean escalables y permitan resolver el problema para redes de  $N$  nodos.

## **3.2. Soluciones Basadas en Modelos Heurísticos**

Como se vió en el capítulo anterior, el problema de enrutamiento y asignación de espectro tiene algunas similitudes con en problema de enrutamiento y asignación de longitudes de onda; esto hace que algunas de las heurísticas aplicadas a RWA sean aplicables también al problema RSA, o que con algunas modificaciones se las pueda aplicar al escenario elástico. Es por esto que varias de las heurísticas que se presentarán en esta sección son heredadas de RWA.

Dado que es muy costoso resolver el problema RSA conjuntamente, los modelos heurísticos abordan separadamente los problemas, por una parte el de enrutamiento y

por otra el de asignación de espectro.

### **3.2.1. Enrutamiento**

En la literatura en general se habla de dos tipos de estrategias de enrutamiento: camino más corto (*Shortest Path*) y balance de carga de los enlaces de la red (*load-balanced routing*). Según lo expuesto por Wang et al. (2012) [6] la estrategia del camino más corto tienen mejores resultados que la de balance de carga en el uso total de recursos espectrales de la red, mientras que esta última logra un mejor rendimiento ante el objetivo de minimizar el índice de los FSU utilizados en la red, vale decir, al balancear la carga, para el enlace que requiere de mayor capacidad, dicha capacidad es menor.

Otro de los métodos más utilizados es el de los k-caminos, usado por Wang et al. (2012) [6] y Abkenar y Rahbar (2017)[9] que pueden haber sido escogidos con cualquiera de las estrategias anteriores, para luego seleccionar de entre los caminos según la heurística de asignación de espectro.

### **3.2.2. Asignación de Espectro**

El problema de asignación de longitud de onda, aunque separado del enrutamiento, también constituye por si solo un problema NP-completo, tal y como lo indican Chatterjee, Sarma y Oki (2015)[10], y por extensión, también problema de asignación de espectro. Esto ha motivado el desarrollo de distintas heurísticas, dentro de ellas aquí se describe a las más significativas.

#### **Random Fit**

Bajo este esquema de asignación se tiene una lista de las longitudes de onda disponibles para el caso del problema RWA, o de los FSUs disponibles en el caso de redes

elásticas, desde esta lista se escoge aleatoriamente los recursos a asignar al usuario.

### **Most Used**

La política Most Used, necesita tener la información respecto a que tan usadas están las longitudes de onda o FSU dentro de los enlaces de la red. Esta estrategia asigna la porción espectral disponible para la ruta del usuario, que esté utilizada en el mayor número de enlaces de la red.

### **Least Used**

Similar a Most Used, Least Used también utiliza la información del uso espectral de todos los enlaces de la red para elegir la porción de espectro a asignar. En este caso, se asigna la porción espectral disponible para la ruta del usuario, que esté utilizada en el menor número de enlaces de la red.

### **Best Fit**

Best Fit es una política exclusiva para redes elásticas, bajo esta política se busca se asigna al usuario la porción espectral inutilizada que tenga mínima diferencia con el número de FSUs requeridos por el usuario. Por ejemplo, si un usuario U tiene un requerimiento de ancho de banda de 2 FSU, Best Fit primero busca un espacio de exactamente 2 FSU contiguos vacíos, si no encuentra, busca un espacio de 3 FSU vacíos que solo tiene una diferencia de 1 FSU y dejará solo 1 FSU fragmentado, luego si no encuentra, busca uno de 4 FSU y así consecutivamente hasta asignar los recursos al usuario.

### **First Fit**

En la política First Fit, las longitudes de onda en el caso de RWA o los FSU en el caso de RSA, están enumerados secuencialmente. Cuando un usuario necesita recursos,

bajo esta política, se intenta asignar el set de FSUs con menor índice disponible para la ruta del usuario.

First Fit es considerada una de las mejores políticas de asignación de espectro dada su simpleza y buenos resultados como mencionan Chatterjee et al. (2015) [10] y una de las más utilizadas. Abkenar y Rahbar (2017) [9] muestran que la mayoría de las soluciones propuestas para RSA utiliza esta heurística de asignación de espectro.

### **3.2.3. Orden de asignación de Recursos**

El orden en el cual se les asigna los recursos a los usuarios puede resultar en un uso diferente del espectro, así lo han señalado Wang et al. (2012) [6], Simmons (2014) [7] y Talebi et al. (2014) [8], donde también se indican como soluciones eficientes de orden de asignación, el ordenamiento decreciente de los usuarios según sus requerimientos de ancho de banda y el ordenamiento también decreciente de los usuarios según el largo de su ruta asignada. Otras aproximaciones utilizan, además de una de estas estrategias de orden, una metaheurística llamada simulated annealing que, según Wang et al. (2012) [6], tiene mejoras en los resultados.



# Capítulo 4

## Modelos Propuestos

En esta sección se propone dos modelos de resolución para el problema RSA estático en topologías de anillo que consideran la influencia del orden de asignación mencionado por Wang et al. (2012)[6] y Simmons (2014)[7].

### 4.1. Idea General

La idea general de los modelos propuestos es, formar subconjuntos de usuarios según algún criterio dado para luego, por cada uno de estos subconjuntos, asignar recursos a los usuarios siguiendo la forma de la topología, es decir, intentado formar un anillo o, en su defecto, un espiral, buscando dar continuidad a la asignación de espectro. Un ejemplo de esto se ilustra en la figura 4.1, donde cada una de las circunferencias que rodea al anillo representa un FSU y a mayor radio tenga esta circunferencia mayor es el índice del FSU. Las flechas en la figura 4.1 indican tanto la orientación de la ruta, como la dirección de asignación, para el caso del ejemplo el orden de asignación de los usuarios es: 1-3, 3-5, 5-2, 2-4, 4-1. Notar que la continuidad de la asignación se observa en que al asignar el nodo destino del primer asignado es el nodo de origen del segundo asignado, a modo general el nodo origen del asignado  $n$  es el destino del asignado  $n-1$ .

Cabe destacar que ambos modelos consideran como política de asignación de espectro la política First Fit.

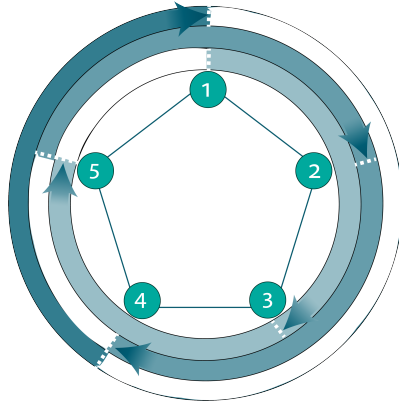


Figura 4.1: Idea de orden de asignación

## 4.2. Modelos Heurísticos

Antes de entrar en detalles del funcionamiento de cada una de las metodologías que se proponen en este trabajo se hace necesario definir cada uno de los conjuntos y elementos involucrados en el diseño.

La red se representa mediante un grafo  $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{L})$ , donde  $\mathcal{N}$  es el conjunto de nodos del anillo y  $\mathcal{L}$  el conjunto de enlaces unidireccionales, con cardinalidades  $N$  y  $L$ , respectivamente.

Se define el conjunto de usuarios  $\mathcal{U} \subset \mathcal{N}^2$ , de cardinalidad  $U$ , dicho conjunto contiene todas las combinaciones posibles de usuarios origen-destino para el grafo  $\mathcal{G}$ . Cada elemento  $u$  tiene la forma  $\langle s_u, d_u, i_u, bw_u \rangle$ , donde  $s_u$  es el nodo de origen,  $d_u$  el nodo destino,  $bw_u$  es el número de FSU contiguos asignados al usuario, considerando que  $i_u$  es el índice que referencia al primer espacio del espectro asignado.

En redes ópticas elásticas, tal y como se mencionó en el capítulo 2, el espectro de frecuencia se divide en segmentos pequeños de frecuencia, denominados FSU (Frequency Slot Unit). Se definen  $\mathcal{BW} = \{bw_u | u \in \mathcal{U}\}$  como el conjunto de requerimientos

de ancho de banda en número de FSU para cada usuario  $u \in \mathcal{U}$ ,  $\mathcal{C} = \{c_\ell | \ell \in \mathcal{L}\}$  el conjunto de capacidades de cada enlace  $\ell \in \mathcal{L}$ , donde la capacidad constituye en número del FSU máximo utilizado y  $\mathcal{F} = \{f_{i\ell} | i \leq c_\ell, \ell \in \mathcal{L}\}$  como el conjunto de FSU por enlace donde cada elemento se puede mapear como  $f_{i\ell}$  donde  $i$  es el índice del FSU y  $\ell$  el enlace al que pertenece dicho FSU.

Del mismo modo, se define  $\mathcal{R} = \{r_u | u \in \mathcal{U}\}$  como el conjunto de rutas más cortas para cada usuario  $u \in \mathcal{U}$  el cual está compuesto por  $\overrightarrow{\mathcal{R}} \subseteq \mathcal{R}$  que contiene las rutas en sentido horario y  $\overleftarrow{\mathcal{R}} \subseteq \mathcal{R}$  que contiene las rutas en sentido antihorario, para estos conjuntos se considera  $r_u$  como la ruta más corta para el usuario  $u$  y  $|r_u|$  el largo de esta ruta medido en número de saltos.

Por último, los subconjuntos  $\mathcal{U}_b \subset \mathcal{U}$  como el conjunto de usuarios con requerimiento de ancho de banda  $b = bw$  para cada  $bw \in \mathcal{BW}$  cuya cardinalidad es  $U_b$ , y  $\mathcal{U}_L \subset \mathcal{U}$  como el conjunto de usuarios cuya ruta más corta es de largo  $L = |r_u|$

### 4.2.1. Estrategia de Enrutamiento

Para ambas estrategias propuestas, las que se detallarán más adelante en este capítulo, se utiliza ruteo fijo, vale decir, se calcula una ruta de antemano y esta será la única ruta para el usuario.

Como en el contexto de este proyecto, la topología de red es un anillo de  $N$  nodos, cada usuario tiene dos rutas posibles: *en sentido horario* y *antihorario*. La ruta asignada a cada usuario será la que tenga un menor número de saltos entre los nodos de origen y destino, sin embargo, en el caso de anillos con  $N$  par, para el usuario diametral, es decir, el usuario cuyos nodos de origen y destino tengan distancia  $N/2$ , la ruta en sentido horario y la ruta en sentido antihorario tendrán igual número de saltos; para estos casos, el criterio de asignación de ruta será balancear el número de usuarios para

cada sentido de ruta: la mitad de los usuarios que se encuentren en este escenario irá en sentido horario y la otra mitad en sentido antihorario.

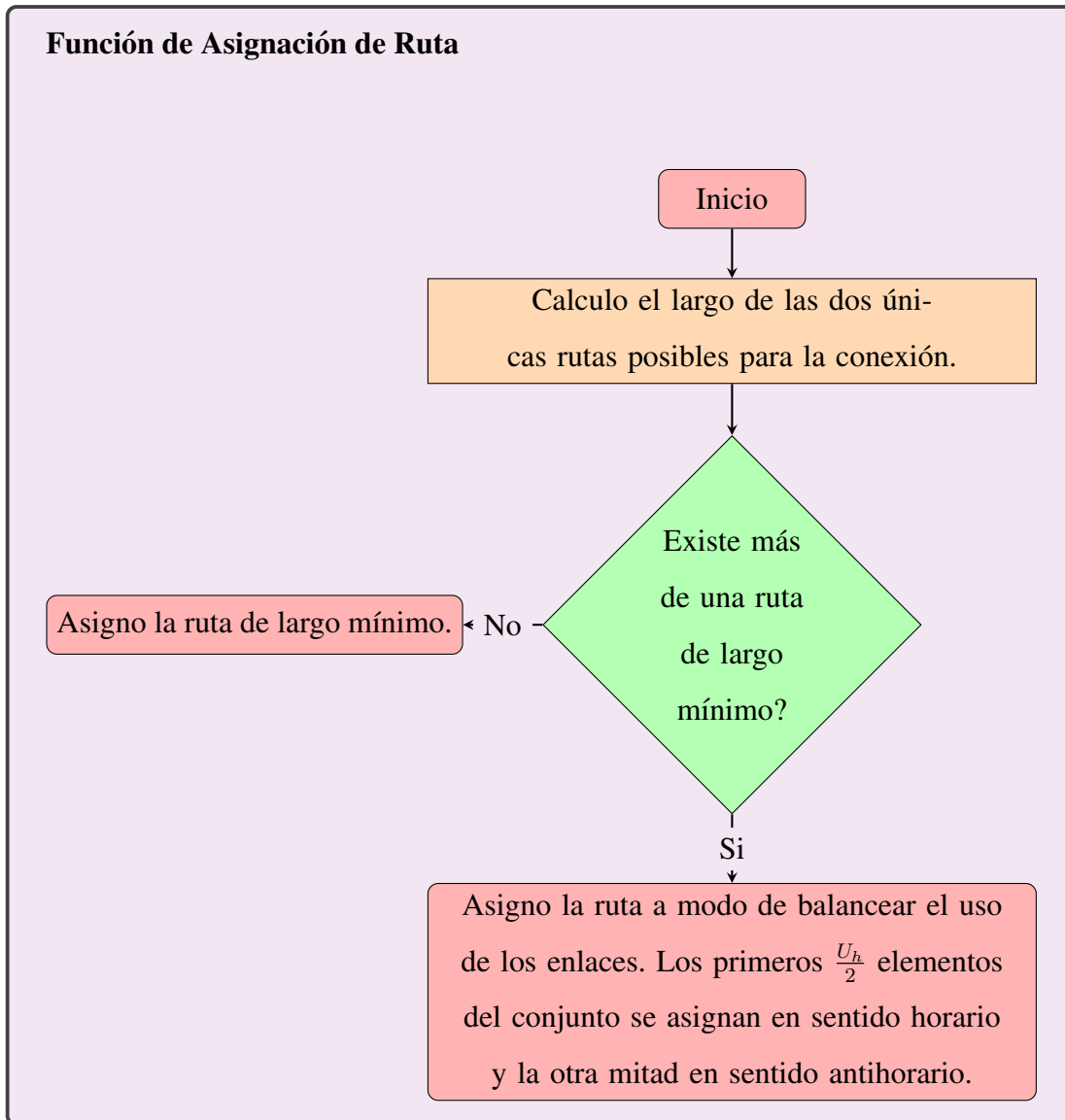


Figura 4.2: Diagrama de flujo de la estrategia de enrutamiento

La estrategia de enrutamiento descrita se detalla, en el diagrama de flujo de la figura 4.2, lo que se traduce en el algoritmo 1, notar que la variable *balance* busca repartir equitativamente a los usuarios cuyas rutas horaria y antihoraria tengan igual largo.

---

**Algorithm 1** Routing

---

```
1: procedure ROUTING( $\mathcal{U}, \mathcal{R}$ )
2:    $balance \leftarrow 0$ 
3:   for all  $u \in \mathcal{U}$  do
4:     Calculate routes of minimum length
5:     if there is just one result then
6:       if  $r_u$  is clockwise then
7:          $\vec{\mathcal{R}} = \vec{\mathcal{R}} \cup r_u$ 
8:       else
9:          $\overleftarrow{\mathcal{R}} = \overleftarrow{\mathcal{R}} \cup r_u$ 
10:      else
11:        if  $balance > N/2$  and  $N \% 2 = 0$  then
12:           $\overleftarrow{\mathcal{R}} = \overleftarrow{\mathcal{R}} \cup r_u$ 
13:        else
14:           $\vec{\mathcal{R}} = \vec{\mathcal{R}} \cup r_u$ 
15:           $balance \leftarrow balance + 1$ 
```

---

#### 4.2.2. Modelo Propuesto: Decreasing Bandwidth-Length Spiral First Fit (DB-SFF)

En este primer modelo propuesto, se divide el conjunto de usuarios  $\mathcal{U}$  en subconjuntos  $U_b$  que tengan los mismos requerimientos de ancho de banda  $b$ , cada uno de estos subconjuntos se ordena según el largo de su ruta asignada en forma decreciente. Luego, al asignar, se hace partiendo por el subconjunto con mayores requerimientos de ancho de banda y siguiendo con cada subconjunto según decrece  $b$ . Dentro de cada subconjunto  $U_b$ , se toman las conexiones según el orden decreciente del largo de ruta que ya se les asignó, pero siguiendo la idea ilustrada en la figura 4.1, esto se puede ver en la figura 4.3. Notar que la función de asignación de ruta es la descrita anteriormente

en la figura 4.2.

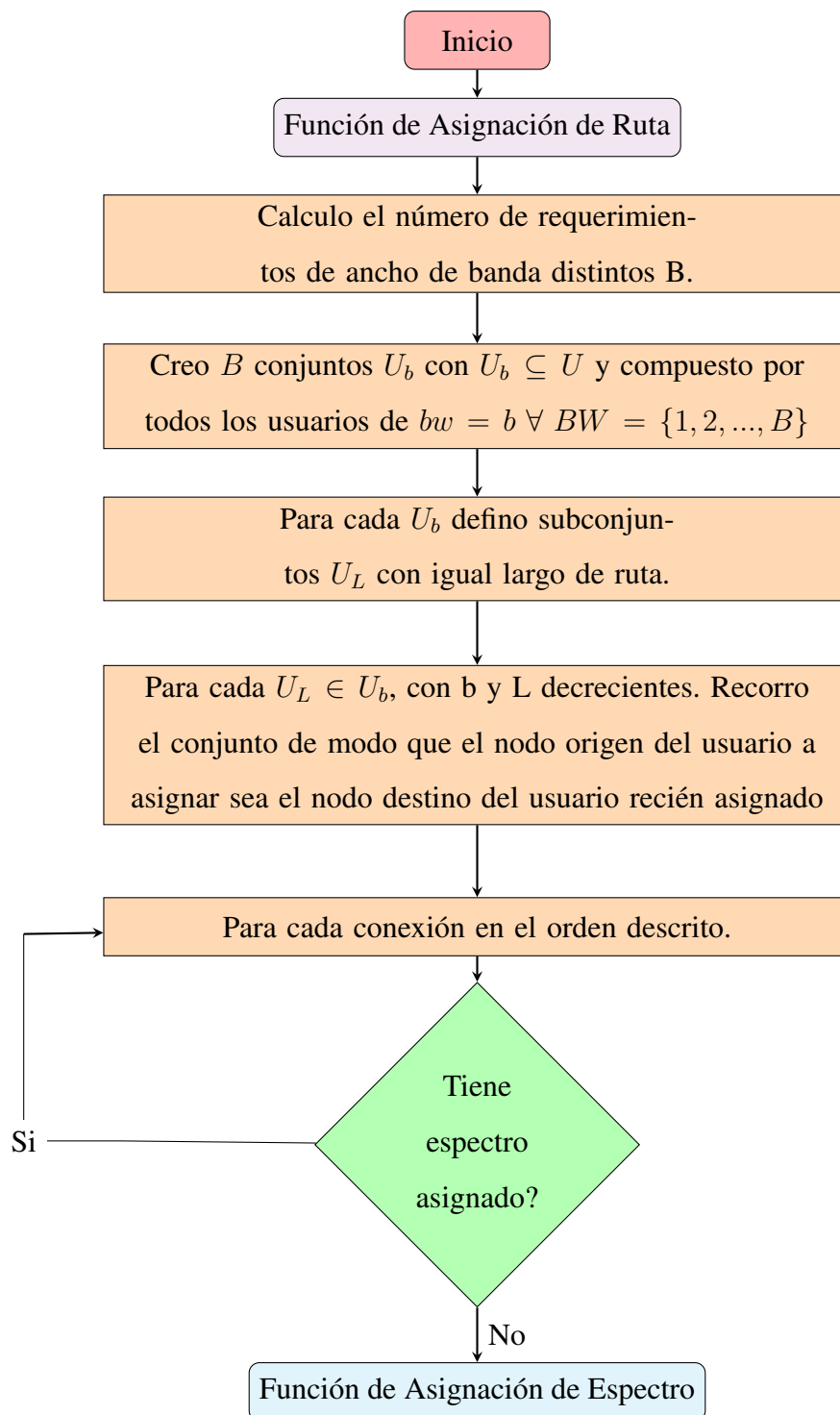


Figura 4.3: Diagrama de Flujo DB-SFF

Desde el diagrama de flujo de la figura 4.3 y los conjuntos descritos al inicio de esta sección, se obtiene el pseudocódigo del algoritmo 2, en este algoritmo la función *Assign* corresponde a asignación según First Fit.

---

**Algorithm 2** DB-SFF

---

**procedure** DB-SFF

$\mathcal{R} = \emptyset$

**for all**  $\ell \in \mathcal{L}$  **do**

$c_\ell = 0$

Routing( $\mathcal{U}$ ,  $\mathcal{R}$ );

$\{\mathcal{U}_1, \dots, \mathcal{U}_b\} = \text{Classify}(\text{BW}, \mathcal{U})$ ;

**for each**  $\mathcal{U}_b \in \mathcal{U}$  **do**

$totalAssigned \leftarrow 0$

sort( $\mathcal{U}_b$ )

▷ sort by length, decreasing order

Assign( $\mathcal{U}_b[1]$ )

$nextSource \leftarrow \mathcal{U}_b[1].d_u$

**while**  $totalAssigned \neq |\mathcal{U}_b|$  **do**

**for**  $j \leftarrow 0$  **to**  $|\mathcal{U}_b|$  **do**

**if**  $\mathcal{U}_b[j].s_u = nextSource$  **then**

Assign( $\mathcal{U}_b[j]$ )

$nextSource \leftarrow \mathcal{U}_b[j].d_u$

**else if**  $j = |\mathcal{U}_b|$  **then**

$nextSource \leftarrow nextSource + 1$

**return**  $\mathcal{U}, \mathcal{R}, \mathcal{C}$

---

### 4.2.3. Modelo Propuesto: Decreasing Length-Bandwith Spiral First Fit (DL-SFF)

En este modelo se propone dividir el conjunto de usuarios en subconjuntos  $U_L$  que tengan el mismo largo de ruta  $|r_u|$  en número de saltos, cada uno de estos subconjuntos se ordena según su requerimiento de ancho de banda de forma decreciente. Luego, al momento de asignar, se inicia por el subconjunto  $U_L$  que contiene a los usuarios con las rutas más largas (de largo  $N/2$ ) y se continua en orden decreciente, dentro de cada  $U_L$  se sigue un orden decreciente según el requerimiento de ancho de banda de los usuarios, teniendo cuidado en seguir la idea de la figura 4.1. Esto se ve en la figura 4.4, lo que se traduce en el algoritmo 3

---

#### Algorithm 3 DL-SFF

---

```

1: procedure DL-SFF
2:    $\mathcal{R} = \emptyset$ 
3:   for all  $\ell \in \mathcal{L}$  do
4:      $c_\ell = 0$ 
5:   Routing( $\mathcal{U}, \mathcal{R}$ );
6:    $\{\mathcal{U}_1, \dots, \mathcal{U}_L\} = \text{Classify}(\text{Length}, \mathcal{U})$ ;
7:   for each  $\mathcal{U}_L \in \mathcal{U}$  do
8:      $totalAssigned \leftarrow 0$ 
9:     sort( $\mathcal{U}_L$ ) ▷ sort by BW, decreasing order
10:    Assign( $\mathcal{U}_L[1]$ )
11:     $nextSource \leftarrow \mathcal{U}_L[1].d_u$ 
12:    while  $totalAssigned \neq |\mathcal{U}_L|$  do
13:      for  $j \leftarrow 0$  to  $|\mathcal{U}_L|$  do
14:        if  $\mathcal{U}_L[j].s_u = nextSource$  then
15:          Assign( $\mathcal{U}_L[j]$ )
16:           $nextSource \leftarrow \mathcal{U}_L[j].d_u$ 
17:        else if  $j = |\mathcal{U}_L|$  then
18:           $nextSource \leftarrow nextSource + 1$ 
19:  return  $\mathcal{U}, \mathcal{R}, \mathcal{C}$ 

```

---

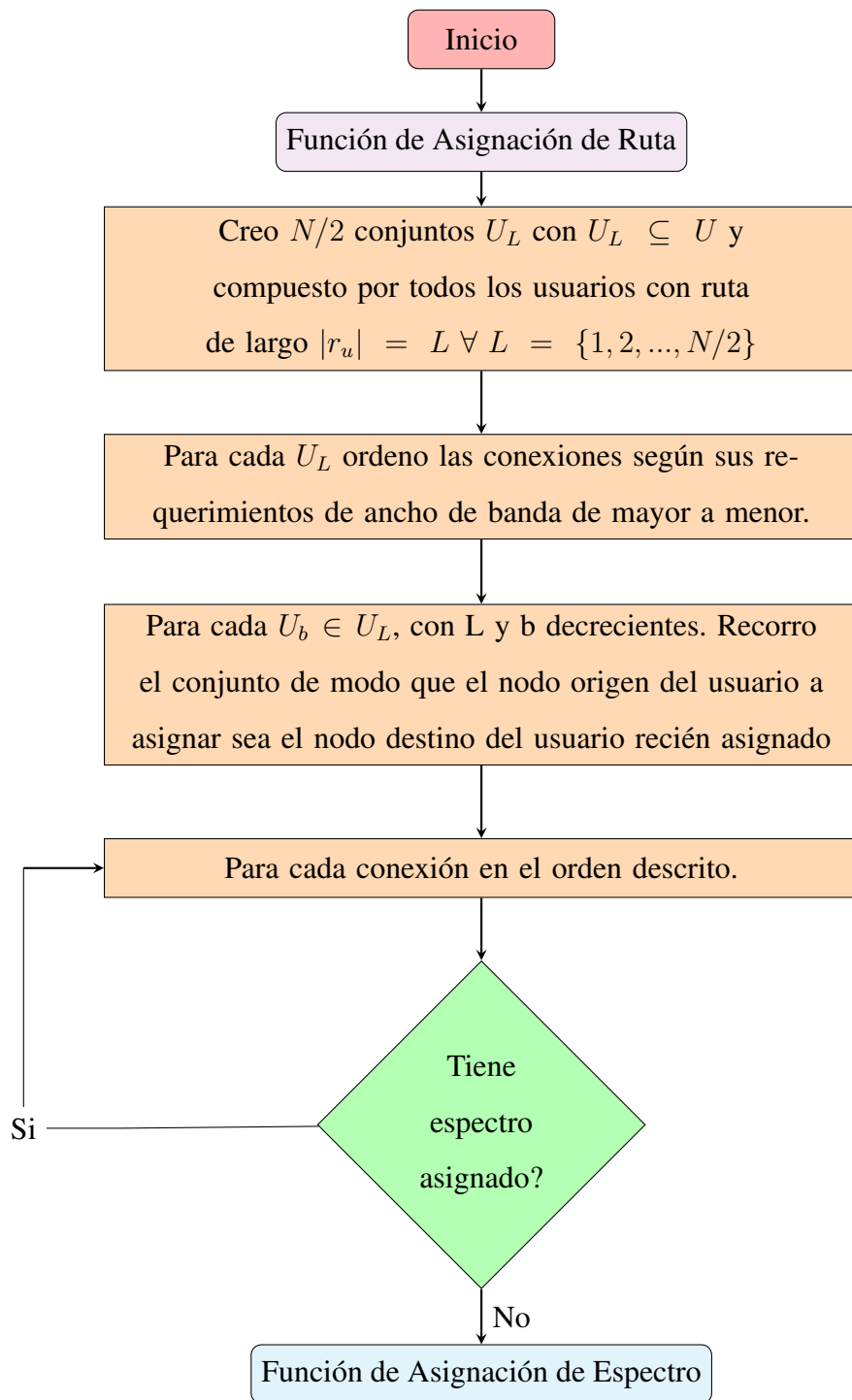


Figura 4.4: Diagrama de Flujo DL-SFF



# Capítulo 5

## Resultados

En esta sección se muestra los resultados de la aplicación de los modelos descritos anteriormente, y se comparan tanto con valores óptimos en caso de redes pequeñas y con métodos descritos en la literatura para redes entre 5 y 50 nodos.

### 5.1. Métricas de Comparación

Para definir cada una de las métricas que utilizaremos para comparar los resultados de los métodos propuestos con lo observado en la literatura, utilizaremos el ejemplo de la figura 5.1.

En la figura se observa en la parte superior el espectro de los enlaces en sentido horario y en la parte inferior el de los enlaces en sentido antihorario, en ambos casos lo que se tiene es una imagen del anillo extendido, lo que nos deja los enlaces como eje horizontal; en el lado izquierdo, a modo de eje vertical se observa los índices de los FSU. Los espacios en blanco son FSUs no utilizados para el enlace según el marco de referencia indicado.

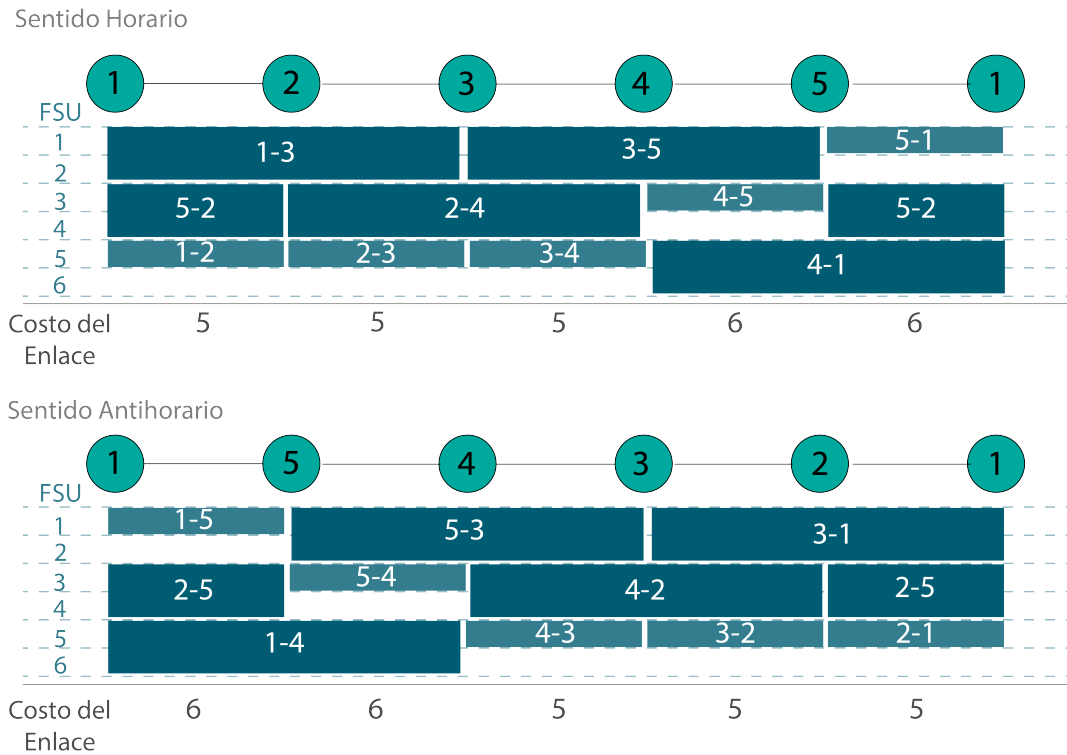


Figura 5.1: Ejemplo de resultado de asignación de espectro para un anillo de 5 nodos.

### 5.1.1. Costo Total de la Red

En la figura 5.1, se muestra al final tanto del espectro de los enlaces en sentido horario como antihorario, el costo de cada enlace, este costo o capacidad del enlace corresponde al último FSU utilizado de dicho enlace. Si hacemos la suma de los costos de cada enlace para todos los enlaces, obtenemos el costo total de la red.

$$\text{Costo Total} = \sum_{\ell}^L c_{\ell} \quad (5.1)$$

### 5.1.2. Fragmentación Relativa al Costo

Tal y como ya se mencionó, en la figura 5.1 los espacios en blanco corresponden a FSUs no utilizados para los enlaces a los que pertenecen. Si dichos espacios en blanco, tienen un índice menor que la capacidad del enlace  $\ell$  al que pertenecen, son espacios

fragmentados.

La *Fragmentación Relativa al Costo* o fragmentación porcentual, es el valor dado por la suma de los espacios fragmentados del espectro respecto del costo total.

$$\text{FRC} = \frac{\text{FSU inutilizados}}{\text{Costo Total}} \quad (5.2)$$

Dada la definición de esta métrica, es que en caso de que se tenga un valor de FRC igual a 0, se puede decir que la asignación de recursos ha sido óptima, y no se tiene porciones del espectro inutilizadas.

## 5.2. Comparación con Modelo de Optimización

En esta sección se comparan los resultados obtenidos en [1], quién propuso una combinación entre una heurística de enrutamiento y un modelo de optimización llamada *Shortest Path Optimal Assignment* (SP-OA) y también un modelo de optimización puro utilizando programación lineal entera.

En [1], se trabajó con topologías de anillo y con dos tipos de requerimientos de ancho de banda para los usuarios: proporcionales al largo de la ruta e inversamente proporcionales al largo de la ruta. En los cuadros 5.1 y 5.2 se muestran los resultados obtenidos en [1] y los obtenidos para los modelos propuestos respecto de las métricas definidas en la sección anterior: FRC y costo total de la red.

Cabe destacar que, tal y como se mencionó en el capítulo 3, debido a la complejidad del problema RSA, los modelos de optimización permiten obtener soluciones solo para redes pequeñas, lo que permite que en esta sección solo se comparen los resultados obtenidos para redes entre 5 y 8 nodos en el caso de los requerimientos de ancho de banda

proporcionales al largo de la ruta y de 5 a 10 nodos en el caso de los requerimientos inversamente proporcionales.

<b>Nodos</b>	<b>Algoritmo</b>	<b>Costo Total</b>	<b>FRC [%]</b>	<b>Tiempo [s]</b>
5	Óptimo(ILP)	54	3,70	0,375
	SP-OA	54	3,70	0,031
	DB-SFF	54	7,40	0,000572
	DL-SFF	54	7,40	0,000883
6	Óptimo(ILP)	114	0,00	49,23
	SP-OA	118	3,39	4,219
	DB-SFF	114	0,00	0,000739
	DL-SFF	114	0,00	0,001014
7	Óptimo(ILP)	198	1,01	997,5
	SP-OA	198	1,01	58,01
	DB-SFF	212	7,54	0,000918
	DL-SFF	214	8,41	0,001252
8	Óptimo(ILP)	353	0,28	429916
	SP-OA	372 <sup>1</sup>	3,49 <sup>1</sup>	21600
	DB-SFF	352	0,00	0,001216
	DL-SFF	359	1,95	0,001408
9	Óptimo(ILP)	-	-	-
	SP-OA	-	-	-
	DB-SFF	572	5,59	0,001401
	DL-SFF	578	6,57	0,001662

<sup>1</sup>Detenido a las 6 horas de ejecución.

<b>Nodos</b>	<b>Algoritmo</b>	<b>Costo Total</b>	<b>FRC [%]</b>	<b>Tiempo [s]</b>
10	Óptimo(ILP)	-	-	-
	SP-OA	-	-	-
	DB-SFF	657	5,78	0,001772
	DL-SFF	672	8,04	0,002093
15	Óptimo(ILP)	-	-	-
	SP-OA	-	-	-
	DB-SFF	2457	4,76	0,004051
	DL-SFF	2556	8,45	0,004176
25	Óptimo(ILP)	-	-	-
	SP-OA	-	-	-
	DB-SFF	13563	4,96	0,024687
	DL-SFF	13888	7,27	0,025282
50	Óptimo(ILP)	-	-	-
	SP-OA	-	-	-
	DB-SFF	100822	2,87	0,21571
	DL-SFF	102307	4,43	0,212102

Cuadro 5.1: Comparación de los métodos propuestos con lo expuesto en [1] para redes con requerimientos de ancho de banda proporcionales al largo de la ruta

<b>Nodos</b>	<b>Algoritmo</b>	<b>Costo Total</b>	<b>FRC [%]</b>	<b>Tiempo</b>
5	Óptimo(ILP)	42	4,76	0,265
	SP-OA	42	4,76	0,031
	DB-SFF	44	9,09	0,000586
	DL-SFF	44	9,09	0,00579
6	Óptimo(ILP)	102	0,00	5,843
	SP-OA	104	1,92	5,969
	DB-SFF	102	0,00	0,000675
	DL-SFF	102	0,00	0,000776
7	Óptimo(ILP)	140	0,00	18,063
	SP-OA	142	1,40	0,344
	DB-SFF	159	11,95	0,000875
	DL-SFF	153	8,59	0,000824
8	Óptimo(ILP)	288	0,00	19,907
	SP-OA	292	1,37	202,5
	DB-SFF	316	8,86	0,001062
	DL-SFF	320	10,00	0,00129
9	Óptimo(ILP)	—	—	—
	SP-OA	362	0,55	752,9
	DB-SFF	412	12,62	0,00129
	DL-SFF	399	9,77	0,001413

<b>Nodos</b>	<b>Algoritmo</b>	<b>Costo Total</b>	<b>FRC [%]</b>	<b>Tiempo</b>
10	Óptimo(ILP)	—	—	—
	SP-OA	646 <sup>2</sup>	5,88 <sup>2</sup>	21600 <sup>2</sup>
	DB-SFF	718	12,25	0,002151
	DL-SFF	708	11,01	0,001995
15	Óptimo(ILP)	—	—	—
	SP-OA	—	—	—
	DB-SFF	1994	6,72	0,004112
	DL-SFF	2124	12,42	0,003923
25	Óptimo(ILP)	—	—	—
	SP-OA	—	—	—
	DB-SFF	7311	9,72	0,019716
	DL-SFF	7456	11,58	0,015275
50	Óptimo(ILP)	—	—	—
	SP-OA	—	—	—
	DB-SFF	63238	7,89	0,179337
	DL-SFF	64038	9,25	0,166378

Cuadro 5.2: Comparación de los métodos propuestos con lo expuesto en [1] para redes con requerimientos de ancho de banda inversamente proporcionales al largo de la ruta

<sup>2</sup>Detenido a las 6 horas de ejecución.

Según lo observado en los cuadros 5.1 y 5.2 los modelos propuestos son capaces de llegar al óptimo en algunos casos, sin embargo, mayoritariamente no alcanzan dicho objetivo. Similar es lo que ocurre en comparación con SP-OA donde este modelo generalmente obtiene mejores resultados, no obstante, también se observa ocasiones donde este algoritmo tiene valores de costo y FRC mayores que los modelos propuestos. En líneas generales los algoritmos propuestos tienen relativa cercanía a los modelos expuestos en [1] para los casos de los datos tabulados.

### 5.3. Comparación Modelos Heurísticos

En esta sección se compara los resultados obtenidos para costo de la red y FRC para redes entre 5 y 50 nodos respecto de lo citado en [7] como ordenes típicos de asignación: decreciente según el largo de la ruta y decreciente según requerimiento de ancho de banda.

**Decreasing Bandwith First Fit (DB-FF):** Se utiliza el mismo esquema de enrutamiento descrito en el capítulo anterior. Se ordenan a los usuarios en orden decreciente según sus requerimientos de ancho de banda y secuencialmente se les asigna una porción del espectro según la política First Fit.

**Decreasing Length First Fit (DL-FF):** Nuevamente, se utiliza el mismo esquema de enrutamiento descrito en el capítulo anterior. Se ordenan a los usuarios en orden decreciente según el largo de su ruta asignada y secuencialmente se les asigna una porción del espectro según la política First Fit.

Las heurísticas fueron aplicadas en tres escenarios de requerimientos de ancho de banda: proporcional, inversamente proporcional al largo de la ruta de los usuarios y pseudoaleatorio.

### 5.3.1. Costo Total de la Red

Bajo todos los escenarios de requerimientos de ancho de banda, el costo total de la red aumenta en el orden de  $N^4$  a medida que aumenta el número de nodos de una red con topología de anillo, independiente del algoritmo. En la figura 5.2 es posible observar este aumento para los distintos algoritmos implementados bajo el contexto de este trabajo de título.

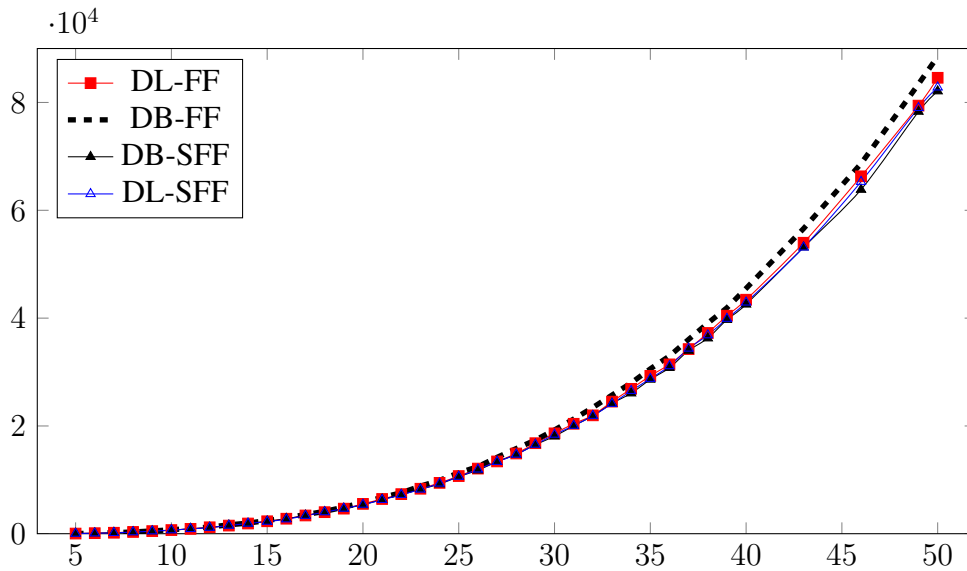
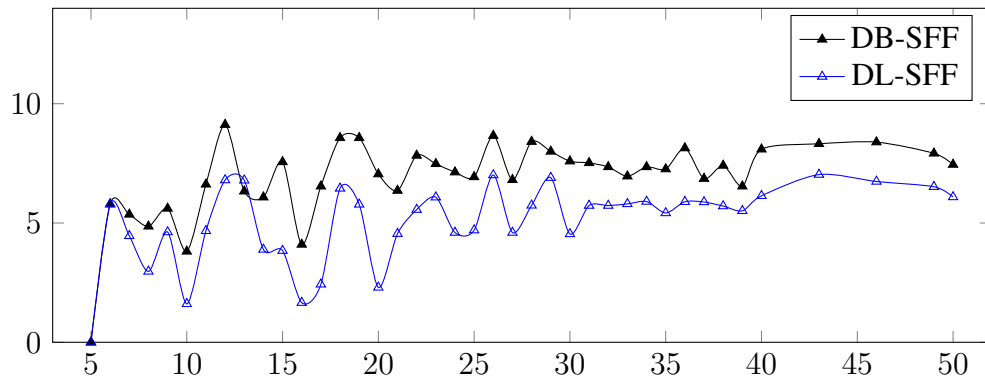


Figura 5.2: Costo Total Segun Número de Nodos de la Red

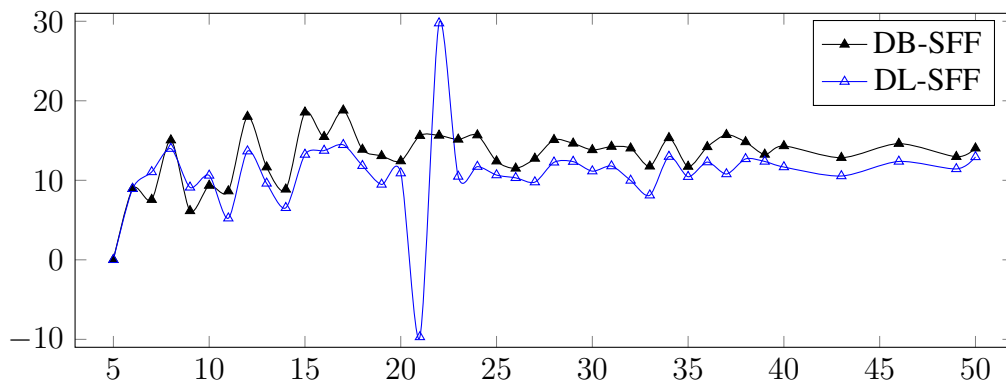
Si bien el gráfico de la figura 5.2 nos ayuda a observar la relación entre el costo total y el número de nodos, no permite visualizar correctamente el rendimiento comparativo de los algoritmos. En la figura 5.3 se ilustra la mejora porcentual para ambos modelos propuestos respecto de DB-FF y en la figura 5.4 la mejora porcentual respecto a DL-FF para los tres escenarios de requerimientos de ancho de banda.

Para todos los casos la mejora porcentual se calcula según la ecuación siguiente:

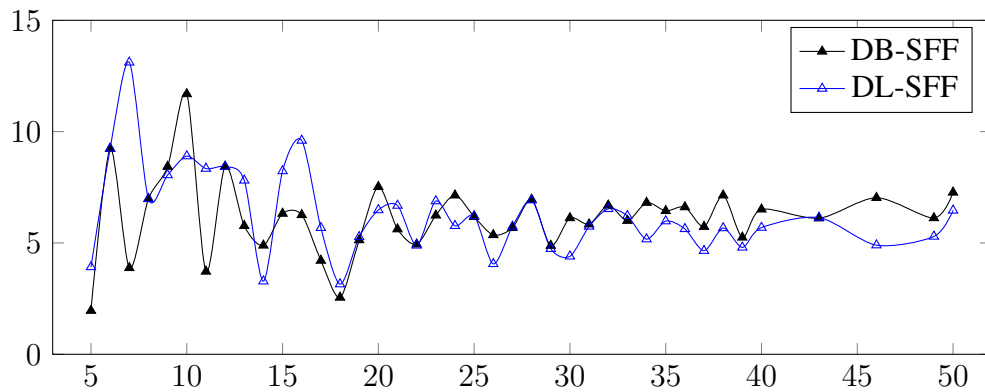
$$Mejora\ Costo\ [\%] = \frac{Costo\ Total_{Referencia} - Costo\ Total_{Algoritmo\ Propuesto}}{Costo\ Total_{Referencia}} \cdot 100 \quad (5.3)$$



(a) Ancho de banda proporcional al largo de la ruta

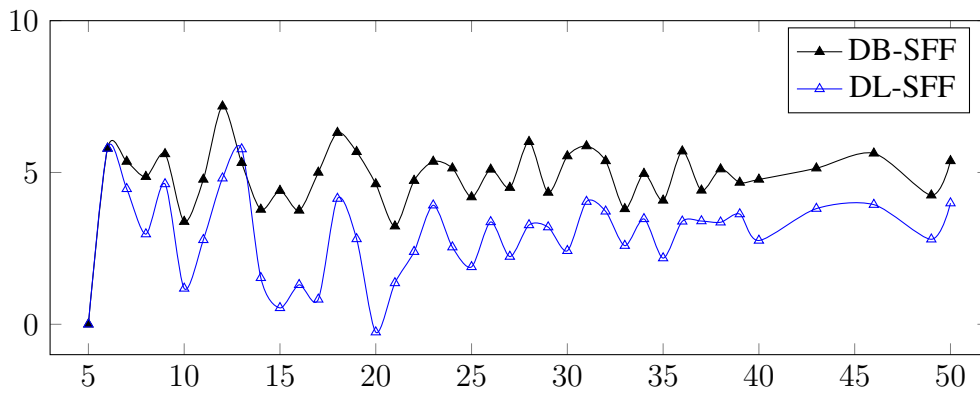


(b) Ancho de banda inversamente proporcional al largo de la ruta

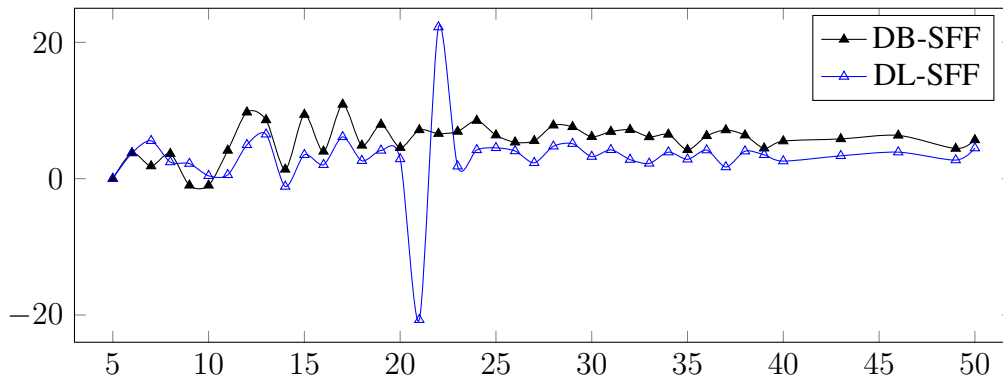


(c) Ancho de banda pseudoaleatorio

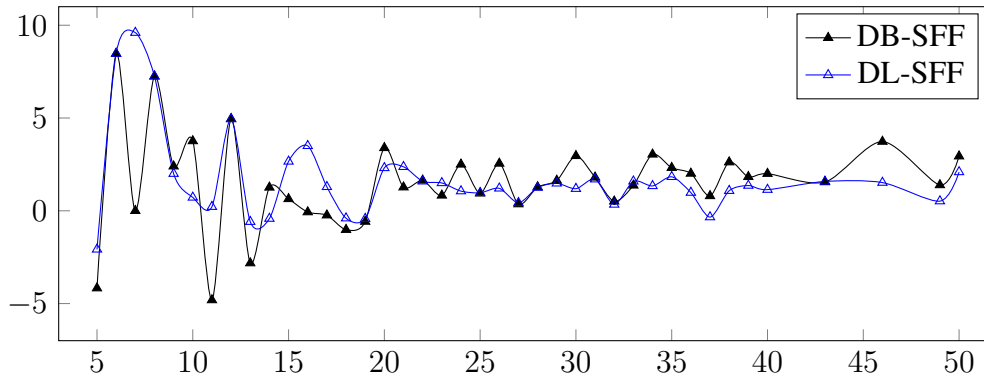
Figura 5.3: Mejora Porcentual del Costo Total comparado con DB-FF



(a) Ancho de banda proporcional al largo de la ruta



(b) Ancho de banda inversamente proporcional al largo de la ruta



(c) Ancho de banda pseudoaleatorio

Figura 5.4: Mejora Porcentual del Costo Total comparado DL-FF

<b>Algoritmo</b>	<b>Proporcional</b>	<b>Aleatorio</b>	<b>Inversamente Proporcional</b>
DB-SFF	6,92 %	6,14 %	13,06 %
DL-SFF	5,06 %	6,29 %	10,79 %
DB-FF	0 %	0 %	0 %

Cuadro 5.3: Mejora promedio porcentual del costo total respecto a DB-FF

<b>Algoritmo</b>	<b>Proporcional</b>	<b>Aleatorio</b>	<b>Inversamente Proporcional</b>
DB-SFF	4,83 %	7,57 %	5,60 %
DL-SFF	2,92 %	1,72 %	3,12 %
DL-FF	0 %	0 %	0 %

Cuadro 5.4: Mejora promedio porcentual del costo total respecto a DL-FF

Se observa en la figura 5.3 que DB-SFF presenta mejoras en todos los casos respecto a DB-FF y DL-SFF también presenta un ahorro en el costo total en todos los casos excepto en el caso de 21 nodos en 5.3 (b). Similar es lo observado en la figura 5.4 donde salvo tres casos, DB-SFF presenta mejor rendimiento que DL-FF y salvo dos casos, DL-SFF también presenta mejor rendimiento comparado.

Lo anterior resulta en los promedios de mejora por tipo de requerimientos de ancho banda resumidos en los cuadros 5.3 y 5.4. En ambos casos se observa que el mejor rendimiento bajo el criterio de costo de la red lo obtiene DB-SFF con mejoras promedio por sobre el 4,83 % en todos los escenarios comparados.

### 5.3.2. Fragmentación Relativa al Costo

#### Número de Slot Fragmentados

Antes de analizar los resultados de fragmentación porcentual o fragmentación relativa al costo, es ilustrativo revisar el número de slots fragmentados para observar el rendimiento de los algoritmos, esta información está contenida en la figura 5.5, donde se puede notar que el número de slots fragmentado crece cuadráticamente según el número de nodos.

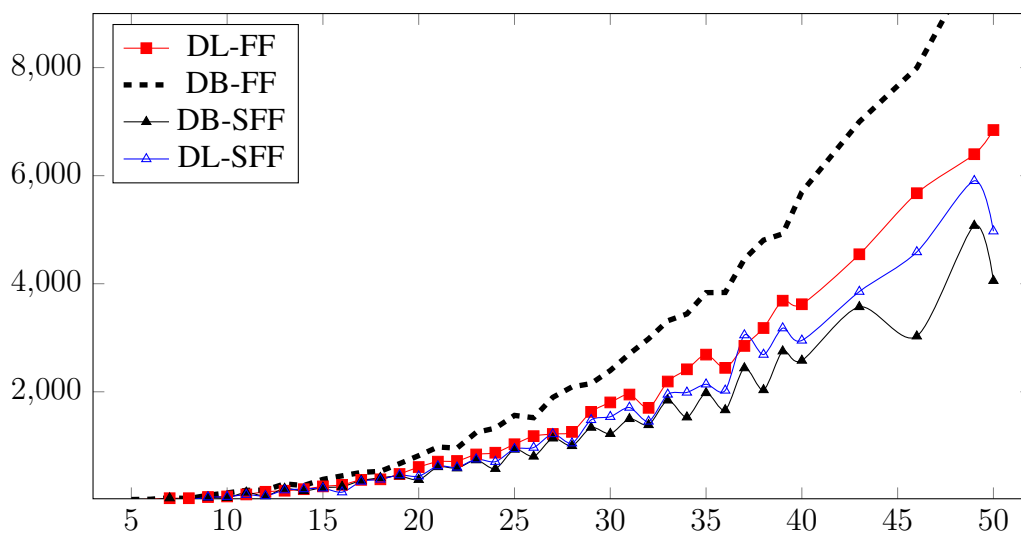
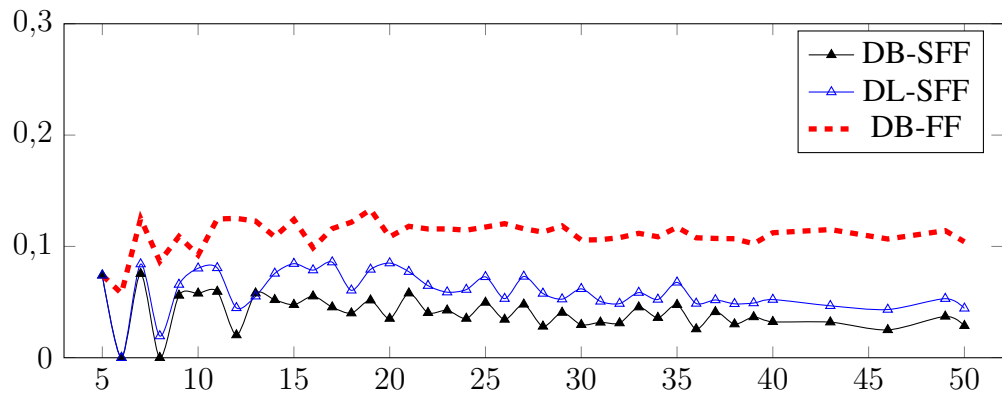


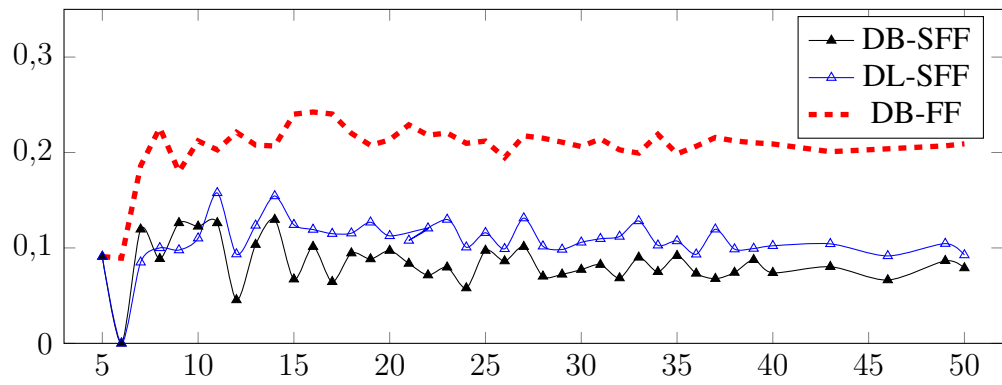
Figura 5.5: Número de FSU Fragmentados Según Número de Nodos de la Red

#### Fragmentación Relativa al Costo

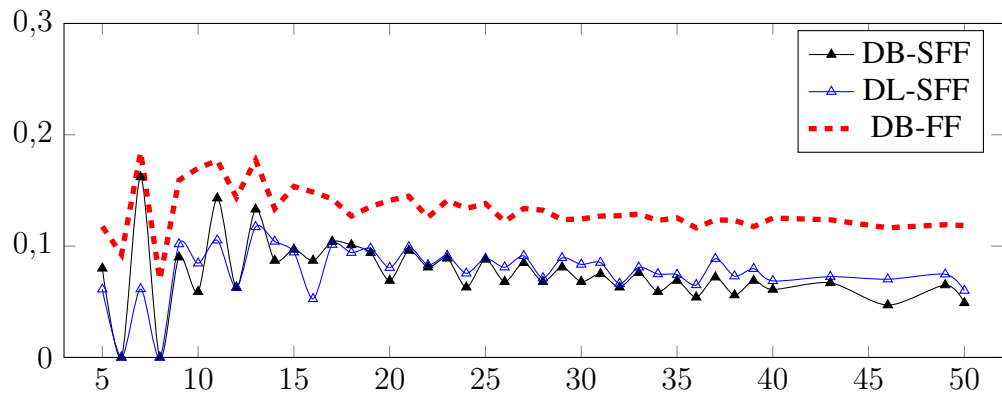
Los gráficos de las figuras 5.6 y 5.7 muestran los datos de fragmentación relativa al costo para redes de anillo de entre 5 y 50 nodos para los tres escenarios de requerimientos de ancho de banda antes descritos.



(a) Ancho de banda inversamente proporcional al largo de la ruta

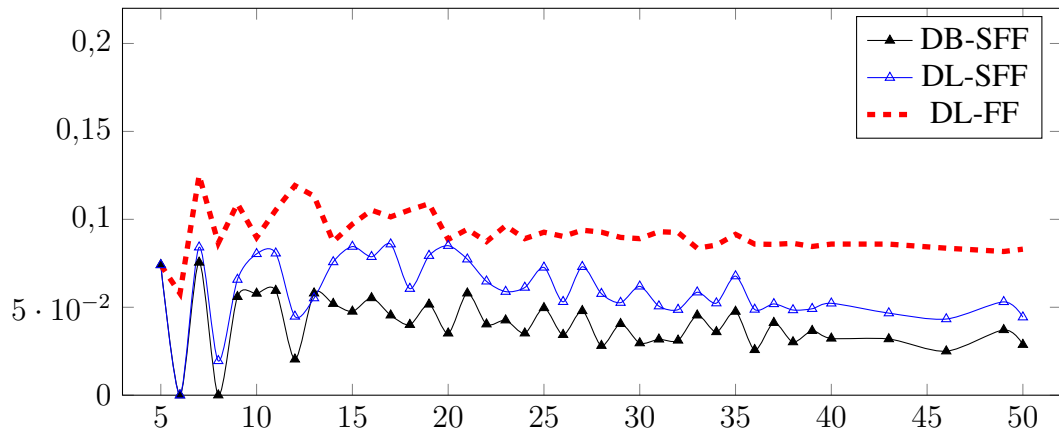


(b) Ancho de banda inversamente proporcional al largo de la ruta

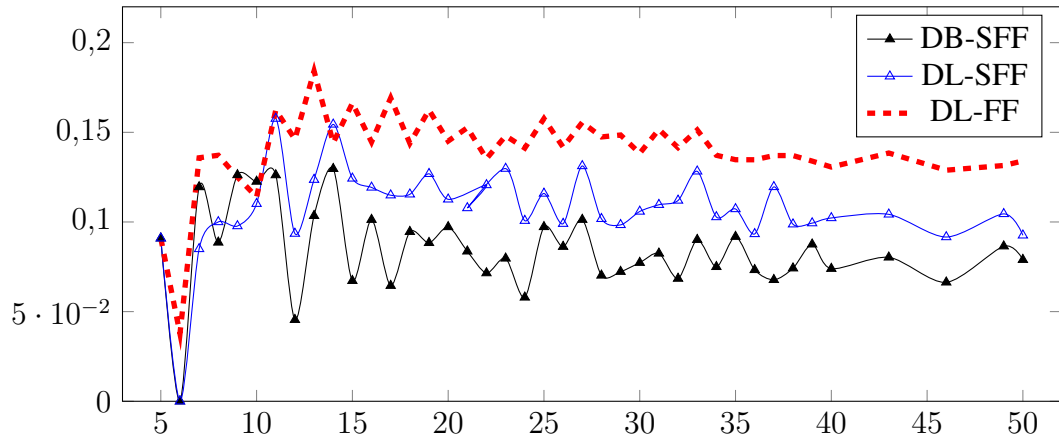


(c) Ancho de banda pseudoaleatorio

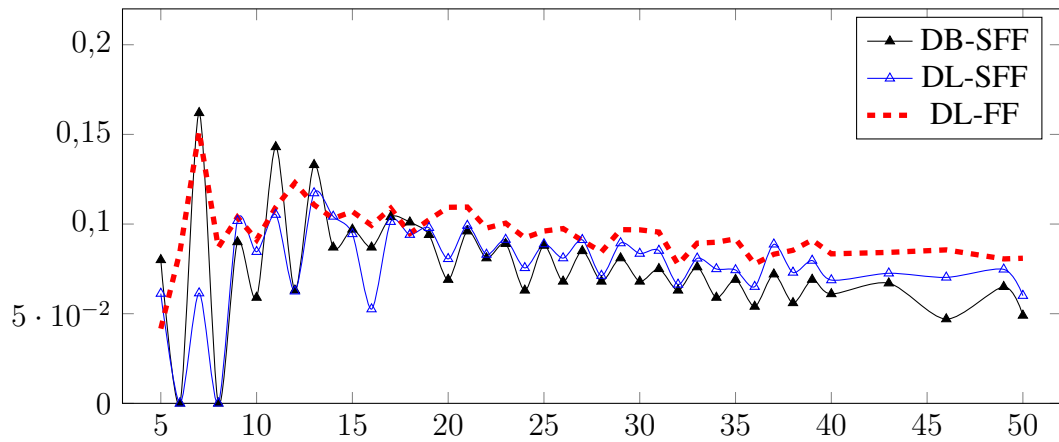
Figura 5.6: Fragmentación Relativa al Costo, comparación de algoritmos propuestos con DB-FF



(a) Ancho de banda proporcional al largo de la ruta



(b) Ancho de banda inversamente proporcional al largo de la ruta



(c) Ancho de banda pseudoaleatorio

Figura 5.7: Fragmentación Relativa al Costo, comparación de algoritmos propuestos con DL-FF

<b>Algoritmo</b>	<b>Proporcional</b>	<b>Aleatorio</b>	<b>Inversamente Proporcional</b>
DB-SFF	3,96 %	7,57 %	8,4 %
DL-SFF	6,01 %	7,77 %	10,75 %
DB-FF	9,24 %	9,47 %	13,99 %
DL-FF	11,03 %	13,27 %	20,57 %

Cuadro 5.5: Resultados FRC Promedio por Algoritmo

En la figura 5.6 se observa que para todos los escenarios y numeros de nodos, el valor de FRC es mayor en DB-FF que en los modelos propuestos. Para el caso de DL-FF mostrado en la figura 5.7 se ve una diferencia más ajustada, sin embargo, salvo algunos casos puntuales, los modelos propuestos nuevamente muestran mejor rendimiento. Lo anterior se ve reflejado en el cuadro 5.5 donde se muestra el promedio de FRC por algoritmo para cada escenario de ancho de banda y se ve que tanto DB-SFF como DL-SFF muestran menor fragmentación porcentual en la red.

A modo general, al igual que con el criterio de costo de la red, los resultados muestran que DB-SFF es la heurística que muestra mejores resultados, obteniendo la menor fragmentación relativa al costo promedio de los algoritmos bajo estudio.



# Capítulo 6

## Conclusiones

Este trabajo presenta dos heurísticas para la resolución del problema de enrutamiento y asignación de espectro en redes ópticas elásticas estáticas con topología de anillo. Los métodos propuestos: *Decreasing Bandwidth-Length Spiral First Fit* y *Decreasing Length-Bandwidth Spiral First Fit*, son comparados tanto con modelos de optimización como con los métodos más eficientes mencionados en la literatura respecto a sus resultados de fragmentación y costo de la red.

Los métodos de optimización permiten comparar resultados solo en redes pequeñas dado que los tiempos de resolución de éstos impiden tener resultados para casos prácticos, sin embargo, para las redes en que los modelos ILP permiten comparación se muestra que los métodos propuestos presentan una cercanía a los valores óptimos, incluso en algunos casos superando a uno de los modelos ILP.

En el caso de comparación con los métodos heurísticos postulados en la literatura, que en el contexto de este trabajo se denominan *Decreasing Bandwidth First Fit* y *Decreasing Length First Fit*, se implementó estos métodos para comparar los resultados de los mismos con DB-SFF y DL-SFF. La implementación de las heurísticas se hizo bajo tres escenarios de requerimientos de ancho de banda para redes de entre 5 y 50

nodos, en un total de 117 casos. Lo obtenido muestra que, en un 98,5 % de los casos se obtiene resultados mejores que los de DB-FF y en un 99,6 % de los casos puestos a prueba se obtiene resultados mejores que los de DL-FF respecto al costo total de la red. Similar es lo que ocurre bajo el criterio de fragmentación porcentual de la red, donde se los algoritmos propuestos muestran mejores resultados de fragmentación relativa al costo en un 100 % de los casos respecto de DB-FF y en un 98,1 % de los casos para la comparación respecto a DL-FF. Por lo tanto, se observa que en la mayoría de los casos ambos métodos propuestos superan los resultados de los métodos de la literatura, sin embargo, es necesario notar que incluso para las excepciones a los porcentajes descritos, siempre hay al menos uno de los métodos planteados en este trabajo que representa una mejora.

A modo general, se concluye que de las heurísticas presentadas en este trabajo de título, la que obtiene mejores resultados es DB-SFF, dado que se observa desde los resultados que entrega ahorros mayores en el costo de la red y menores resultados de fragmentación relativa al costo.

# Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por FONDEF ID14I10129, CONICYT, a quienes se agradece el soporte prestado a este proyecto.



# Bibliografía

- [1] Cristobal Meza, Nicolas Jara, Victor M. Albornoz, and Reinaldo Vallejos. Routing and spectrum assignment for elastic, static, and without conversion optical networks with ring topology. *Proceedings - International Conference of the Chilean Computer Science Society, SCCC*, pages 1–8, 2017.
- [2] Víctor López and Luis Velasco, editors. *Elastic Optical Networks*. Optical Networks. Springer International Publishing, Cham, 2016.
- [3] Cisco. Cisco visual networking index: forecast and methodology, 2017-2022, 2018.
- [4] Helio Waldman. The Impending Optical Network Capacity Crunch. *Sbfoton Conference*, pages 0–3, 2018.
- [5] ITU-T and G.694.1(06/2002) ITU.T, International Communication Union. Planes espectrales para las aplicaciones de multiplexación por división de longitud de onda: Plan de frecuencias con multiplexación por división de longitud de onda densa Resumen. *Series G.694.1*, page 14, 2012.
- [6] Xiong Wang, Kaixuan Kuang, Sheng Wang, Shizhong Xu, Hong Liu and Gordon Ning Liu Abstract—Elastic. Dynamic Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks With Mixed Line Rates. 6(November):1–5, 2012.
- [7] Jane M. Simmons. *Optical Network Design and Planning*. Optical Networks. Springer International Publishing, Cham, 2014.

- [8] Sahar Talebi, Furqan Alam, Iyad Katib, Mohamed Khamis, Reda Salama, and George N. Rouskas. Spectrum management techniques for elastic optical networks: A survey, 2014.
- [9] Forough Shirin Abkenar and Akbar Ghaffarpour Rahbar. Study and Analysis of Routing and Spectrum Allocation (RSA) and Routing, Modulation and Spectrum Allocation (RMSA) Algorithms in Elastic Optical Networks (EONs), 2017.
- [10] Bijoy Chand Chatterjee, Nityananda Sarma, and Eiji Oki. Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2015.