

2016

# RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE RUTEO Y ASIGNACIÓN DE ESPECTRO PARA REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS, ESTÁTICAS, SIN CONVERSIÓN Y CON TOPOLOGÍA DE ANILLO

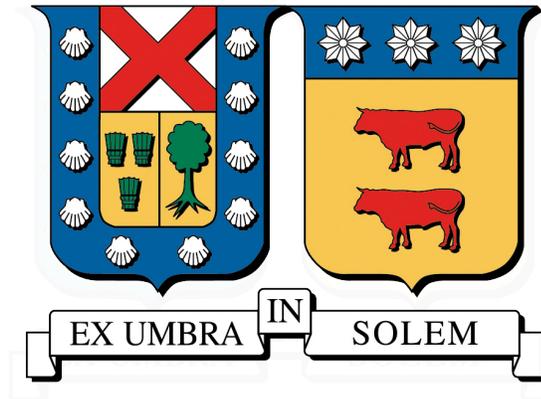
MEZA VÁSQUEZ, CRISTÓBAL IGNACIO

---

<http://hdl.handle.net/11673/22106>

*Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA*

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS  
SANTIAGO - CHILE



**RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE RUTEO Y ASIGNACIÓN DE  
ESPECTRO PARA REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS, ESTÁTICAS,  
SIN CONVERSIÓN Y CON TOPOLOGÍA DE ANILLO.**

**Cristóbal Ignacio Meza Vásquez**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE  
MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA INDUSTRIAL  
Y AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA : SR. VÍCTOR M. ALBORNOZ  
PROFESOR CORREFERENTE : SR. REINALDO VALLEJOS  
PROFESOR CORREFERENTE : SR. HÉCTOR CANCELA

OCTUBRE 2016

## Agradecimientos

Primero que todo, agradecer a mis padres, Juan y Patricia. No hay satisfacción más grande para mí que hacerlos sentir orgullosos de su largo trabajo, el cual tuvo sus cimientos en el amor y en el apoyo incondicional. Les agradezco de todo corazón porque invirtieron todo en nosotros, y por fin algo les puedo retribuir. Los amo.

A mis hermanos, Mauricio y Francisco, por ser claros ejemplos de que uno puede ser lo que desea en la vida y que con esfuerzo y sacrificio los logros son más valorados.

A Isabel, Miguel, Emilio y Javiera, por estar constantemente apoyándome y motivándome en este largo camino. Mis logros son para ustedes también.

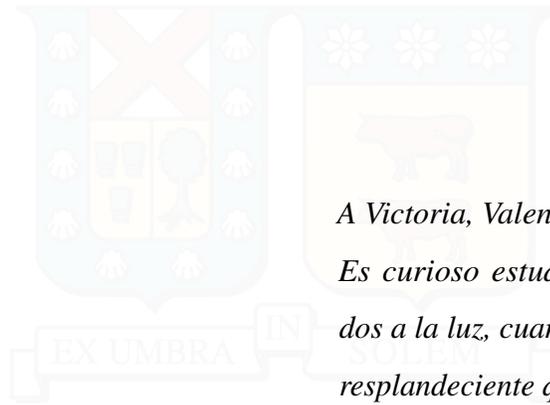
A Catalina por alentarme a seguir adelante, por ser paciente y por quererme tal cual soy. Gracias por llegar y permanecer en mi vida.

A mis compañeros de universidad, quienes hicieron de estos largos años un camino lleno de risas y anécdotas que serán difíciles de olvidar. Dentro de éstos, quisiera hacer una mención especial a Javier, Marcelo y José por estar juntos hasta el final, muchas gracias amigos.

Quiero agradecer también a mis profesores de tesis, Víctor Albornoz y Reinaldo Vallejos, quienes han guiado este trabajo. Son dos grandes valuartes de la universidad, ejemplos a seguir como profesores y como personas.

Finalmente agradecer a la Dirección General de Investigación y Postgrado y al Departamento de Industrias de la USM, quienes contribuyeron con financiamiento parcial para el trabajo aquí presentado.

Muchas gracias a todos . . .



*A Victoria, Valentina y Clemente.*

*Es curioso estudiar fenómenos asociados a la luz, cuando no hay destello más resplandeciente que el que emiten sus miradas.*

---

## RESUMEN EJECUTIVO

En este artículo se aborda la resolución del problema de ruteo y asignación de espectro para redes ópticas elásticas, estáticas, sin conversión de longitud de onda con topología de anillo. El problema consiste en encontrar una ruta para cada conexión y asignarle la misma porción de espectro en cada enlace de dicha ruta. La solución propuesta minimiza el costo de la red, representado como la suma de unidades de frecuencia utilizadas en cada enlace. Se formula un modelo de programación entera que representa el problema descrito. Como estrategia de resolución se propone un método en dos etapas que primero encuentra la ruta más corta para cada conexión para luego emplear el modelo de programación entera, utilizando únicamente las rutas propuestas. Se muestran los resultados obtenidos en dos tipos de instancias, y se comparan con los resultados de Shortest Path-First Fit. El método propuesto logra hasta un 22 % de ahorro.

**Palabras Clave.** Programación entera, redes ópticas elásticas, ruteo y asignación, redes ópticas WDM, conversión de longitud de onda.

---

## ABSTRACT

In this article we solve the Routing and Spectre Assignment problem for elastic, static, without wavelenght conversion networks with ring topology. The problem is to find a route for each connection and assign the same portion of spectrum in each link of the route. The proposed solution minimizes the cost of the network, represented as the sum of frequency slot units used on each link. An integer programming model it's used to represent the described problem. As a method of resolution we propose a solving strategy in two stages to first find the shortest path for each connection and then use the integer programming model, using only the proposed routes. The results of two types of instances are displayed and compared with the results of Shortest Path-First Fit. The proposed method achieves up to 22 % savings.

**Keywords.** Integer programming, Elastic optical networks, Routing and assignment, Wavelength division multiplexing, Wavelength conversion.

# Índice de Contenidos

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos	3
1.1.1. General	3
1.1.2. Específicos	4
1.2. Motivación	4
1.3. Estructura	5
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>6</b>
2.1. Introducción a las redes ópticas	6
2.1.1. Arquitectura de las telecomunicaciones	7
2.1.2. Técnicas de multiplexación	8
2.1.3. Tipos de Malla	10
2.2. Estado del Arte	14
2.2.1. Origen del problema: R&WA	14
2.2.2. Modelos propuestos: R&WA Problem	16
2.2.3. Modelos propuestos: Ruteo	21
2.2.4. Redes Elásticas: R&SA Problem	24
<b>3. Metodología</b>	<b>28</b>
3.1. Modelo de Programación Entera	28
3.1.1. Conjuntos	29
3.1.2. Parámetros	30
3.1.3. Variables de decisión	30
3.1.4. Función objetivo	31
3.1.5. Restricciones del modelo	31
3.2. Estrategia de resolución: Shortest Path-Optimal Assignment (SP-OA)	34
<b>4. Resultados</b>	<b>36</b>
4.1. Descripción	36
4.2. Generación de Instancias	36
4.3. Métrica: Fragmentación Relativa al Costo	37
4.4. Resultados Computacionales	38
4.4.1. Resultados mediante Modelo de PE	38
4.4.2. Resultados mediante SPOA	45
4.5. Análisis de Resultados	45

<b>5. Conclusiones</b>	<b>49</b>
5.1. Investigaciones futuras . . . . .	49
<b>Bibliografía</b>	<b>51</b>
<b>A. Código AMPL (.mod)</b>	<b>53</b>



# Índice de Tablas

2.1. Comparación de los requerimientos espectrales de una red con grilla fija de 50[GHz] y una grilla elástica (EON) según bit rate y tipo de modulación. Fuente: Gerstel et al. (2012) . . . . .	12
4.1. Número de variables y restricciones según cantidad de nodos de la red. . .	37
4.2. Resultados de la instancia tipo 1 (conexiones más largas, menor ancho espectral) para distintos tamaños de red. *Detenido a las 6 horas de ejecución.	46
4.3. Resultados de la instancia tipo 2 (conexiones más largas, mayor ancho espectral) para distintos tamaños de red. *Detenido a las 6 horas de ejecución.	47

# Índice de Figuras

2.1. Multiplexación por división de tiempo. Fuente: Ramaswami et al. (2009) .	9
2.2. Multiplexación por división de longitud de onda. Fuente: Ramaswami et al. (2009) . . . . .	10
2.3. Uso del espectro según bit rates en malla estática y en malla elástica. Fuente: Gerstel et al. (2012) . . . . .	11
2.4. Representación gráfica de una red con topología de anillo de 6 nodos, bidireccional. . . . .	14
2.5. Ruta más corta desde el Nodo 0 al Nodo 2. Fuente: Zang et al. (2000) . .	22
2.6. Ruta principal (línea continua) y ruta alternativa (línea punteada) desde el Nodo 0 al Nodo 2. Fuente: Zang et al. (2000) . . . . .	23
2.7. Ruteo adaptativo desde el Nodo 0 al Nodo 2. Fuente: Zang et al. (2000) .	24
4.1. Ruteo y Asignación de Espectro de una red con 5 nodos, resuelta a optimalidad, para una instancia tipo 1 (conexiones mas largas, menor ancho espectral). . . . .	39
4.2. Ruteo y Asignación de Espectro de una red con 6 nodos, resuelta a optimalidad, para una instancia tipo 1 (conexiones mas largas, menor ancho espectral). . . . .	39
4.3. Ruteo y Asignación de Espectro de una red con 7 nodos, resuelta a optimalidad, para una instancia tipo 1 (conexiones mas largas, menor ancho espectral). . . . .	40
4.4. Ruteo y Asignación de Espectro de una red con 8 nodos, resuelta a optimalidad, para una instancia tipo 1 (conexiones mas largas, menor ancho espectral). . . . .	41
4.5. Ruteo y Asignación de Espectro de una red con 5 nodos, resuelta a optimalidad, para una instancia tipo 2 (conexiones mas largas, mayor ancho espectral). . . . .	42
4.6. Ruteo y Asignación de Espectro de una red con 6 nodos, resuelta a optimalidad, para una instancia tipo 2 (conexiones mas largas, mayor ancho espectral). . . . .	42
4.7. Ruteo y Asignación de Espectro de una red con 7 nodos, resuelta a optimalidad, para una instancia tipo 2 (conexiones mas largas, mayor ancho espectral). . . . .	43

4.8. Ruteo y Asignación de Espectro de una red con 8 nodos, resuelta a optimalidad, para una instancia tipo 2 (conexiones mas largas, mayor ancho espectral). . . . . 44



# 1 | Introducción

La industria de las Telecomunicaciones a nivel mundial enfrenta grandes desafíos tecnológicos ante el crecimiento exponencial de la demanda por ancho de banda. Esto se explica tanto por el aumento de las necesidades de parte de los consumidores que ya tienen acceso al servicio como por la aparición de nuevas aplicaciones que requieren transmitir grandes volúmenes de información: redes sociales, IP TV, voz sobre IP, streaming en HD, juegos en línea, servicios en la nube, etc. Para satisfacer esta necesidad, la única tecnología disponible en la actualidad son las redes ópticas con multiplexación por división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing: WDM) que pueden transmitir información a tasas del orden de terabits por segundo (Tb/s) por pelo de fibra ([Saleh y Simmons \(2011\)](#); [Sano et al. \(2012\)](#)).

La arquitectura de redes ópticas existente consta de una malla de canales cuyo ancho espectral es fijo y corresponde a 50[GHz], según la estandarización que hace la International Telecommunications Union (ITU). Esta solución fue durante mucho tiempo eficaz en la transmisión de datos ya que este ancho espectral soporta conexiones con tasas de hasta 100[Gb/s], lo cual permitía generar conexiones sin problemas para los requerimientos de hace 10 años atrás. El problema surge en que actualmente las demandas son significativamente mayores, tasas que alcanzan los 400[Gb/s] y hasta 1[Tb/s], y además heterogéneas, es decir, hay aún más diferencias entre las tasas de transferencia de baja velocidad con las de alta velocidad. En el caso que se requiera de una conexión con bit rates elevados, como por ejemplo de 400[Gb/s], se hace necesario realizar una demultiplexación del requerimiento en requerimientos más pequeños, por ejemplo, en conexiones de 100[Gb/s]. De esta forma se logra que la conexión sea transmisible por la malla estática propuesta por la ITU. El problema radica en que cada demultiplexación requiere un gran uso del espectro, siendo

esta solución poco eficiente. Por otro lado, en caso de tener envíos de información con tasas de transmisión pequeñas, todo el ancho del canal que no se haya utilizado en esa conexión se pierde debido a la imposibilidad de superponer requerimientos de distintas conexiones. Dada esta ineficiencia, en la literatura se visualiza como solución la aplicación de una arquitectura elástica para las redes ópticas [Monroy et al. \(2011\)](#); [Gerstel et al. \(2012\)](#); [Tomkos et al. \(2012\)](#); [Sambo et al. \(2012\)](#). Esto le permitiría a los ISP (Internet Service Providers) ejecutar la transmisión de datos de manera más eficiente ya que el ancho de cada canal se ajusta según la necesidad de transmisión de cada conexión, dejando atrás las mallas fijas de 50[GHz]. Para implementar esta nueva tecnología se deben resolver diversos problemas, dentro de los cuales está el problema de ruteo y asignación de espectro.

Para entender este problema se deben definir ciertos términos que son utilizados en el contexto de redes ópticas. Primero, una red óptica está compuesta por una cierta cantidad de usuarios. Estos usuarios pueden ser proveedores de servicio o usuarios finales. Cada uno de estos usuarios tiene un switch óptico que actúa como un buffer, que indica, según las distintas longitudes de onda, qué canal se habilitará para transmitir información entre este usuario y otro usuario de la red. Para efectos prácticos, de aquí en adelante se supondrá que cada usuario tiene un switch óptico y se tratará a esta unidad integrada como un **nodo**. La forma en que se comunican dos nodos en redes ópticas es a través de un cable de fibra óptica. Este cable permite la transmisión de información entre los nodos mediante ondas electromagnéticas, las cuales se diferencian unas de otras según la posición que ocupen del espectro electromagnético. A esta conexión entre nodos vecinos mediante un cable de fibra óptica se le llamará **enlace**. De esta forma, una **red óptica** queda definida según la cantidad de nodos que posee y según la topología de los enlaces que unen pares de nodos. Una vez definida la red óptica, se define como **conexión** a la transferencia de información entre un par de nodos y, a su vez, se define como **ruta** al conjunto de nodos por los que se debe pasar para poder comunicar al par de nodos que lo requieran. Esta conexión debe utilizar cierta parte del espectro electromagnético y debe ser la misma porción a lo largo de todos los enlaces de su ruta, ya que no puede haber superposición de dos conexiones en algún enlace. A las distintas porciones del espectro se les llamará **canales**, y cada enlace de

la red tiene la totalidad de su espectro separado en distintos canales, los cuales pueden ser utilizados por conexiones.

Habiendo definido esto, el problema de ruteo y asignación de espectro consiste en encontrar una ruta para cada conexión de la red y asignarle a cada una el canal que deberá utilizar en cada enlace que pertenezca a su ruta.

En esta tesis, se presenta una estrategia de resolución en dos partes, que resuelve este problema determinando, en primer lugar, la ruta que debe utilizar cada conexión mediante el uso de una heurística, para luego asignar una porción del espectro a cada conexión mediante un modelo de programación entera. Este último impone la no conversión (uso de un único canal) a lo largo de la ruta que se determinó en el primer paso. El uso de este modelo de programación entera permite obtener asignaciones para cada conexión que generan el menor costo posible de la red.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. General

El objetivo general de este trabajo es **formular una estrategia de resolución basada en el empleo de una heurística y un modelo de programación entera que permita resolver el problema de ruteo y asignación de espectro para redes ópticas elásticas, estáticas, sin conversión de longitud de onda y con topología de anillo**. El resultado de esta estrategia deberá indicar cuál será la ruta a utilizar y también cuáles serán los canales asignados para cada conexión de la red, disminuyendo siempre la cantidad de canales a utilizar de manera global.

### 1.1.2. Específicos

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Hacer una revisión exhaustiva de la literatura.
- Identificar propuestas de solución al problema.
- Desarrollar un modelo de programación entera para resolver el problema.
- Validar el modelo y empleando instancias reales.
- Complementar el modelo con el desarrollo de una heurística que permita resolver instancias con mayor eficiencia.
- Evaluar el desempeño de la estrategia propuesta mediante la comparación de resultados con otras soluciones propuestas.

## 1.2. Motivación

Este trabajo presenta una alternativa para resolver el problema de ruteo y asignación de espectro en redes ópticas elásticas, estáticas, sin conversión y con topología de anillo. Esta topología es la que más se utiliza en las metrópolis dada su baja complejidad a la hora de transmitir datos por una malla fija. Con el crecimiento exponencial de la demanda por ancho de banda resulta necesario flexibilizar la malla, dejando atrás los canales de 50 [GHz] propuestos por la International Telecommunications Union (ITU) para pasar a mallas flexibles, que se adecúen al ancho espectral que necesite cada conexión. Con este nuevo paradigma vienen nuevos desafíos tanto de hardware como de software. Uno de los problemas que generan mayores diferencias en los costos asociados a la transmisión de información es el ruteo y asignación de espectro. En la literatura ya se han formulado distintas estrategias de resolución, como se verá en la sección 2.2, las cuales se pueden separar en dos grandes conjuntos: Modelos de Programación (Entera o Lineal) y Heurísticas.

En el caso de las resoluciones mediante Modelos de PE se logran resultados óptimos pero no resulta factible resolver instancias con tamaños medianos o grandes debido a la

complejidad NP-Complete que presenta el problema. Por otro lado, las estrategias que utilizan heurísticas son capaces de resolver instancias con una mayor cantidad de nodos pero sacrificando optimalidad. Debido a esto se ha optado por las estrategias conjuntas, como la que se presenta en esta tesis, dado que se puede combinar lo mejor de los dos tipos de resolución. El problema de las demás estrategias que hay en la literatura es que si bien las combinaciones entre modelos de programación y heurísticas logran un buen balance entre optimalidad y eficiencia, existe otra variable que afecta al rendimiento, la cual es la flexibilidad de las estrategias para resolver redes con diferentes topologías. En general lo que se hace es que se genera una estrategia que pueda resolver cualquier topología de red, lo que genera una mayor complejidad a la hora de resolver el problema y los resultados son estrategias que se alejan del óptimo más de lo deseado y requieren tiempos de resolución grandes. Lo innovador que propone esta memoria es una solución específica para una topología de red, la cual es ampliamente utilizada, con el fin de hallar mejores soluciones al problema en el mismo tiempo o menor que otras estrategias.

### **1.3. Estructura**

El presente documento se organiza de la siguiente manera: En el capítulo 2 se hace una revisión de la literatura afín al presente trabajo mientras que en el capítulo 3 se presenta el problema de ruteo y asignación de espectro, el modelo propuesto y la metodología de solución. En el capítulo 4 se muestran los resultados computacionales aplicados a dos tipos de instancias de interés junto a un análisis a los ahorros potenciales que se generan al pasar de una red con grilla inelástica a una grilla elástica como se propone. Finalmente en el capítulo 5 se enumeran las conclusiones de este trabajo y los problemas que se deberán abordar en investigaciones futuras.

## 2 | Marco Teórico

### 2.1. Introducción a las redes ópticas

Actualmente, y ya desde comienzos del nuevo milenio, estamos viendo cambios dramáticos en la industria de las telecomunicaciones que han tenido efectos importantes en nuestros estilos de vida. Hay muchos factores que motivaron estos cambios. Lo primero, y lo más importante por lo demás, es la necesidad incesante de tener más capacidad en la red. Este aumento en la demanda se explica por diversos factores, uno es el enorme crecimiento de Internet y de la World Wide Web, tanto en términos de número de usuarios como en la cantidad de tiempo que éstos hacen uso de ésta. Este fenómeno ha provocado que el tráfico de datos en Internet haya crecido rápidamente durante muchos años, comportamiento que de seguro continuará. Las estimaciones de crecimiento, si bien han variado considerablemente a lo largo de los años, siempre resultan ser altas, con las estimaciones más recientes en torno al 50 % anual como lo presentan los estudios de [Ramaswami et al. \(2009\)](#).

Como respuesta, las tecnologías de acceso a la banda ancha tales como la Digital Subscriber Line (DSL) y módems por cable, que proporcionan anchos de banda por usuario en el orden de 25 Mb/s, se han desplegado ampliamente en la población. Por ejemplo, en 2014 alrededor del 90 % de los habitantes en los Estados Unidos tuvo acceso de banda ancha en sus hogares mientras que en Chile actualmente ronda el 70 % de la población total según datos de la Subsecretaría de Telecomunicaciones. Por otro lado, la fibra hasta el hogar ha mostrado un crecimiento sostenido en los mercados del mundo, mostrando una importante penetración en el mercado. Al mismo tiempo, las empresas hoy en día requieren de redes

de alta velocidad para llevar a cabo sus operaciones. En este caso las redes se utilizan tanto para interconectar múltiples áreas dentro de una empresa, así como para comunicarse con otras empresas. Grandes corporaciones que utilizaban líneas de 155 Mb/s para interconectar sus sitios internos ahora están utilizando líneas que permiten tasas de 1 Gb/s y más.

Existe también una fuerte correlación entre el aumento de la demanda y el costo del ancho de banda. Los avances tecnológicos han tenido éxito en reducir continuamente este costo y esta reducción a su vez estimula el desarrollo de un nuevo conjunto de aplicaciones que hacen uso de más ancho de banda, afectando así los patrones de conducta de los usuarios. Un ejemplo sencillo es que a medida que las llamadas telefónicas tenían un precio más bajo, la gente pasaba más tiempo en el teléfono. Este desarrollo a su vez impulsa la necesidad de más ancho de banda en la red. Este ciclo de retroalimentación positiva no muestra señales de disminuir en un futuro próximo. Además, el tráfico de la red está dominado por los datos en lugar del tradicional tráfico de voz. En el pasado sucedía lo contrario, por lo que las redes tradicionales fueron diseñadas para apoyar de manera eficiente la voz en lugar de los datos. Hoy en día, los servicios de transporte de datos no los presta necesariamente el mismo proveedor que ofrece el servicio de telefonía, y ya son capaces de proporcionar un servicio de calidad en aplicaciones que son tan sensibles a una eficaz transferencia de datos como lo son la voz en tiempo real y video en alta definición. Estos factores han impulsado el desarrollo de las redes ópticas de alta capacidad y su notablemente rápida transición de los laboratorios de investigación a su desarrollo comercial, motivo por el cual es de suma importancia seguir desarrollando métodos que mejoren la calidad en el empleo eficiente ancho de banda.

### **2.1.1. Arquitectura de las telecomunicaciones**

El enfoque de esta memoria se centra exclusivamente en las denominadas redes públicas, que son redes operadas por proveedores de servicios (ISP por sus siglas en inglés), o carriers, como son llamados a menudo. Éstos utilizan su red para proporcionar una variedad de servicios a sus clientes. Además de las compañías tradicionales que ejecutaban este servicio, las cuales eran principalmente compañías telefónicas, hoy en día existen empresas que se

dedican tanto a la interconexión de ISP's como a proporcionar mayor ancho de banda para otras compañías, e incluso existen proveedores virtuales que proporcionan servicios sin poseer ninguna infraestructura física.

Las instalaciones que sí debe poseer un carrier son los equipos para manejar y monitorear la red, y el cableado de fibra óptica. El despliegue de estos cables puede ser distribuido de diferentes formas, tales como:

- Enterradas bajo tierra.
- Mediante torres similares a las de alta tensión.
- Siguiendo a las tuberías de petróleo y gasoductos.
- Vías de Ferrocarril.
- Vía submarina.

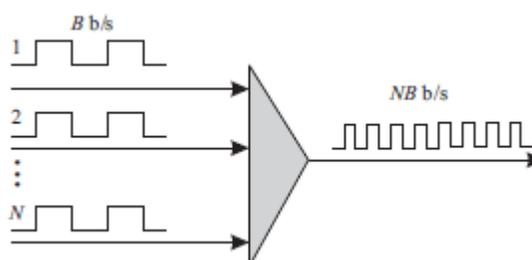
En otros casos, los carriers pueden arrendar las instalaciones de otros carriers y, a su vez, ofrecer servicios a otras empresas para aprovechar estas instalaciones. Por ejemplo, un proveedor de servicios de telefonía de larga distancia no puede, por ley, ser propietaria de una red, por lo tanto éstas se asocian con los carriers para así ofrecer el servicio completo, telefonía e Internet, a los usuarios finales.

### 2.1.2. Técnicas de multiplexación

Debido al crecimiento característico que tiene la demanda por ancho de banda, aproximadamente un 50 % anual, y dado que ampliar la capacidad de fibra instalada requiere de altos costos y de altos tiempos de instalación, se hace necesario utilizar una tecnología que no requiera, o en su defecto retrase lo más posible, la instalación de nuevos cables. La respuesta a este requerimiento es la **Multiplexación**, técnica que permite combinar múltiples señales, ya sean análogas o digitales, en una sola señal, la cual utiliza una sola fibra en vez de la cantidad que se utilizaría si las señales se enviaran por separado. Existen dos maneras fundamentales de incrementar la capacidad de transmisión en una fibra.

### Time Division Multiplexing

Consiste en incrementar la tasa de transmisión, multiplexando varias señales de baja velocidad, para dar como resultado una señal con una tasa mayor. Por ejemplo, sesenta y cuatro señales de 155 Mb/s se pueden multiplexar en una sola señal de 10 Gb/s. Actualmente, la mayor velocidad que se ha alcanzado mediante esta tecnología son 100 Gb/s (Das et al., 2014), pero más allá de estas velocidades se hace necesario aplicar otras técnicas. Diversas investigaciones han demostrado que se pueden multiplexar múltiples señales de 10 Gb/s en una de 250 Gb/s, pero la implementación comercial de esta tecnología no es viable aún.

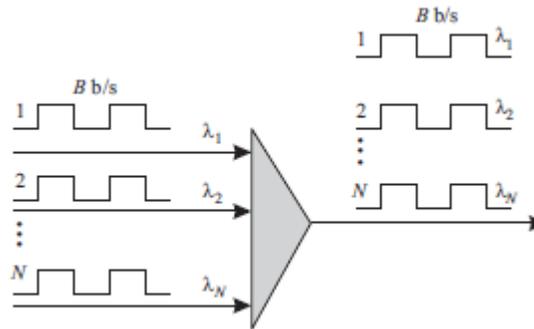


**Figura 2.1:** Multiplexación por división de tiempo. Fuente: Ramaswami et al. (2009)

### Wavelength Division Multiplexing

Otra forma de incrementar la capacidad de transmisión es usando la Multiplexación por división de longitud de onda, o **WDM** por sus siglas en inglés. Esta tecnología consiste en transmitir distintas señales simultáneamente bajo distintas longitudes de onda en el mismo pelo de fibra. Estas señales no interfieren unas con otras debido a que existe una separación suficientemente amplia que previene problemas en el envío y recepción de los datos. Entonces, si con la TDM un pelo de fibra transportaba una señal, la WDM provee "fibras virtuales", en el sentido de que una fibra ahora es capaz de transmitir varias señales, cada una en una longitud de onda diferente a la otra. Dado esto, estas redes han sido ampliamente utilizadas en largas distancias, instalándose incluso bajo el mar, como también en redes locales.

Ambos tipos de transmisión, TDM y WDM, proveen formas de aumentar la capacidad de transmisión y son complementarias. Es por eso que las redes de hoy utilizan una



**Figura 2.2:** Multiplexación por división de longitud de onda. Fuente: [Ramaswami et al. \(2009\)](#)

combinación de TDM y WDM. Con estos avances, se ha logrado llegar en laboratorios a velocidades de transmisión de hasta 1.125 Tb/s.

### 2.1.3. Tipos de Malla

Dado que los resultados obtenidos por la multiplexación por división de longitud de onda han sido ampliamente superiores a los obtenidos por la multiplexación por división de tiempo, los esfuerzos se han dedicado en resolver variados problemas que han surgido en la implementación de esta tecnología con el propósito de hallar mejoras de la eficiencia en el uso del ancho de banda. Como se dijo en la sección anterior, el uso de la WDM genera "fibras virtuales". Estas fibras virtuales no son más que distintas longitudes de onda de un haz de luz que viaja por un pelo de fibra real. Al juntar todos los pelos de fibra que componen un cable de fibra óptica se genera una "malla" o "grilla" óptica, por la cual se transmite información sin haber ningún tipo de interferencia.

#### Malla Fija

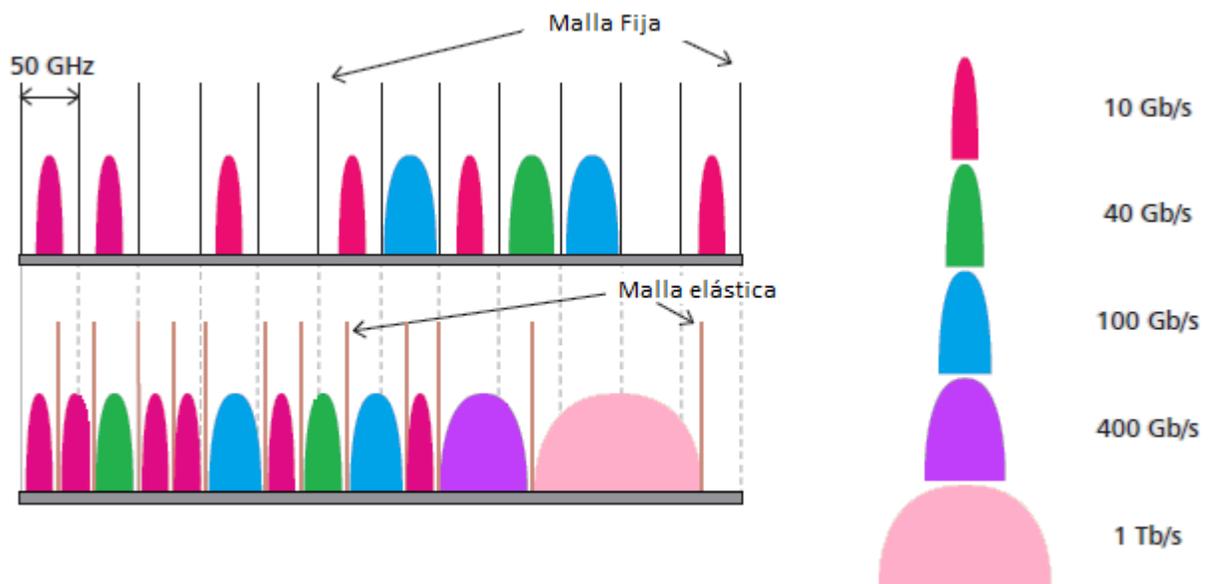
Esta malla, dada la necesidad de evitar las interferencias, tiene actualmente un ancho fijo para cada "fibra virtual", el cual según recomendaciones de la International Communications Union (ITU) debe ser de 50 [GHz] de ancho espectral. Dado que este ancho es fijo, las tasas a las cuales se puede llegar a transmitir información también lo son. De hecho, la máxima tasa que se puede alcanzar en un canal (fibra virtual) es de 100 Gb/s, generando así que las transmisiones que sean más altas que esa velocidad necesiten de la multiplexación. Esto genera un problema de eficiencia, debido a que una de las restricciones de la red es

que un canal sólo puede ser utilizado por una señal, por lo que si tenemos una señal de, por ejemplo 110 Mb/s, se utilizará todo un canal más una pequeña porción de otro canal. El problema radica en que aunque se utilice sólo una pequeña porción del canal, éste ya no puede ser utilizado por otra conexión, perdiendo así eficiencia en la transmisión de señales. Lo mismo ocurre cuando se transmite a bajas tasas de transferencia, como por ejemplo 10 Mb/s.

### Malla Elástica

Debido a la baja eficiencia que se genera al tener una malla fija, las investigaciones apuntan a que uno de los métodos más prometedores en el futuro de las redes ópticas es cambiar los métodos de transmisión fijos por métodos elásticos. Esto consta de dos cambios principales en la forma de enviar información:

- 1.- El espectro óptico puede ser dividido de manera flexible, dejando atrás los canales fijos de 50[GHz].
- 2.- Los transceptores pueden emitir señales y recibir señales con ancho espectral variable.



**Figura 2.3:** Uso del espectro según bit rates en malla estática y en malla elástica. Fuente: [Gerstel et al. \(2012\)](#)

En la Tabla 2.1 se muestran algunos casos de comparación entre la solución mediante grilla fija de 50[GHz] y la malla elástica, donde se llegan a tener ahorros de un 150 % con

Bit rate requerido (Gb/s)	Formato de modulación	Ancho de banda del canal (GHz)	Solucion con malla fija	Ganancia espectral al utilizar una malla elastica
40	DP-QPSK	25+10	1 canal de 50 GHz	35 GHz vs. 50 = 43 %
100	DP-QPSK	37.5+10	1 canal de 50 GHz	47,5 GHz vs. 50 = 5 %
100	DP-16QAM	25+10	1 canal de 50 GHz	35 GHz vs. 50 = 43 %
400	DP-QPSK	75+10	4 canales de 50 GHz	85 GHz vs. 200 = 135 %
400	DP-16QAM	75+10	2 canales de 50 GHz	85 GHz vs. 100 = 17 %
1000	DP-QPSK	190+10	10 canales de 50 GHz	200 GHz vs. 500 = 150 %
1000	DP-16QAM	190+10	5 canales de 50 GHz	200 GHz vs. 250 = 25 %

**Tabla 2.1:** Comparación de los requerimientos espectrales de una red con grilla fija de 50[GHz] y una grilla elástica (EON) según bit rate y tipo de modulación. Fuente: [Gerstel et al. \(2012\)](#)

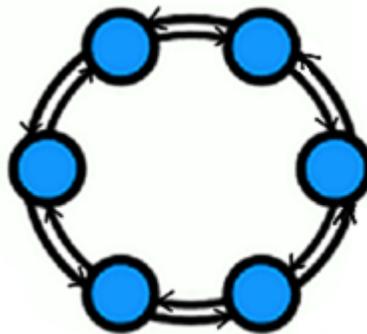
respecto a la tecnología actual. Las redes ópticas elásticas, debido a su naturaleza flexible, ofrecen un sistema de transmisión escalable, flexible y transparente que puede aumentar la eficiencia espectral y energética. Sin embargo, este tipo de arquitectura incluye nuevos desafíos con respecto al diseño, administración y control de la red. Con este cambio en el paradigma de transmisión de información mediante redes ópticas se genera la posibilidad de que por cada canal se puedan hacer envíos de 1 Tb/s y más, pero para esto se tienen que resolver distintos problemas, entre los cuales se destaca el que se aborda en este trabajo de tesis: **El problema de ruteo y asignación de espectro.**

## 2.2. Estado del Arte

En esta sección se describe el problema abordado por la presente memoria y algunas de las propuestas de solución presentadas por otros autores

### 2.2.1. Origen del problema: R&WA

Para entender de mejor manera el problema que se aborda en la presente memoria lo mejor es conocer el problema que lo antecede, el problema de ruteo y asignación de longitud de onda o R&WA por sus siglas en inglés, y además, presentar algunas terminologías. Supongamos una red óptica tipo anillo, bidireccional, con  $N$  nodos y  $V$  vértices, representable por un grafo  $\mathcal{G}(\mathcal{N}, \mathcal{V})$  como el que se muestra en la Figura 2.4.



**Figura 2.4:** Representación gráfica de una red con topología de anillo de 6 nodos, bidireccional.

Supongamos además que existen ciertos requerimientos de conexión, para cada nodo  $n \in \mathcal{N}$  con los  $N - 1$  nodos restantes. Además, al ser una red óptica tipo anillo, cada uno de estos requerimientos puede tomar una de dos rutas para generar la conexión, la ruta horaria o la ruta anti-horaria. Cada uno de los enlaces de la red tiene un ancho espectral, el cual define su capacidad de soportar conexiones, y en el caso del R&WA esta capacidad se divide en una malla fija la cual, según la convención propuesta por la International Telecommunications Union (ITU), debe ser de 50[GHz] por canal. Al ancho espectral de estos canales, medido en [GHz], se le llamará Frequency Slot (FS), el cual, en el R&WA es fijo. Entonces, se debe decidir para cada conexión cuál será la ruta que tomará, y además, cuál será el canal por el que se realizará la conexión. En caso de que un requerimiento

de conexión sea mayor al FS, 50[GHz] en el R&WA, éste se debe demultiplexar, es decir, dividir el envío en múltiples canales ocupando siempre una mayor cantidad de ancho espectral del que efectivamente tiene el paquete de datos, para luego multiplexarlo en el nodo de llegada. Una vez decidida la ruta que recorrerá la conexión, y mediante qué canal lo hará, el problema queda resuelto y se cuantifica el costo de la red como la suma de los costos de cada enlace perteneciente a la red. El costo de un enlace queda definido por la cantidad de FS asignados, sin importar si la totalidad de las asignaciones son utilizadas o no. Por ejemplo, en caso que del ancho espectral total de un enlace ocupe sólo el último FS, el costo quedaría definido por la suma del FS utilizado y de todos los que lo anteceden, sin importar que éstos no tengan ninguna conexión a su haber.

Como se dijo anteriormente, la conexión entre nodos se realiza mediante distintos canales, y es importante destacar que cada conexión debe cumplir con las siguientes restricciones:

- **Uso único de Longitud de Onda:** Establece que los canales de un enlace pueden ser usados sólo por una conexión en cualquier tiempo dado. La relación siempre será 1:1, a menos que algún canal no sea utilizado por ninguna conexión.
- **Sin Conversión de Longitud de Onda:** Una vez decidido un canal  $p$  para generar la conexión entre los nodos  $(i, j)$ , ésta se debe mantener utilizada por esa conexión en todos los enlaces de su ruta, sin poder cambiar de canal. Si en alguna parte de la ruta ese canal se encuentra utilizado por otra conexión, se deberá utilizar otro canal para establecer la nueva conexión.

Esta malla fija de canales fue la mejor respuesta a los requerimientos de conexión del pasado, ya que las demandas eran relativamente homogéneas y además superaban en pocas ocasiones el FS de 50[GHz]. El problema con los requerimientos actuales es que éstos se realizan con bit rates del orden de los 400 [Gb/s] por canal, los cuales superan ampliamente el FS de 50[GHz] obligando a demultiplexar los paquetes en reiteradas ocasiones, generando pérdidas al no utilizar de manera eficiente los canales. Una solución lógica sería aumentar el ancho espectral de los canales a, por ejemplo, 100[GHz], lo cual resolvería el problema de

los bit rates altos. El problema es que actualmente los requerimientos no son homogéneos, y si bien existen algunos requerimientos del orden de los 400 [Gb/s] también existen otros de 10 [Gb/s], y dada la restricción de uso único de canal se utilizaría en estos casos una fracción ínfima de los 100[GHz] disponibles, lo que generaría enormes pérdidas por el poco uso del FS.

### **2.2.2. Modelos propuestos: R&WA Problem**

Como resolución al problema de R&WA existen varias estrategias, algunas que resuelven el problema conjunto y otras que resuelven sólo partes del mismo como lo es el ruteo o la asignación por separado. Existen también resoluciones para redes estáticas y dinámicas, las cuales se diferencian con que en la primera se sabe con anterioridad cuáles son los requerimientos de conexión entre nodos mientras que en el segundo caso los requerimientos llegan de forma gradual.

#### **R&WA para redes estáticas**

En este problema los requerimientos son conocidos a priori, y las operaciones de ruteo y asignación se realizan off-line. El objetivo típico es minimizar el número de longitudes de onda asignadas dada una cierta topología de red, cumpliendo con todos los requisitos de conexión. Como alternativa a minimizar la cantidad de longitudes de onda de la red se puede resolver el problema dual, maximizar el número de conexiones que se pueden establecer (minimizar el bloqueo) dado un cierto número de longitudes de onda y dado un set de requerimientos de conexión. Este problema dual presenta el inconveniente de que sus soluciones tenderán a establecer más conexiones cortas, las cuales viajan a través de menos enlaces que las conexiones más largas.

Este problema, aplicando la restricción de continuidad de longitud de onda, puede ser formulado como un problema de programación entera (PE) donde la función objetivo es minimizar la cantidad de conexiones que pasan por cada enlace lo que es similar a minimizar el número de conexiones que pasan por un enlace en particular. El modelo se presenta a continuación:

## Parámetros

$\lambda_{sdw}$  : Denota el tráfico (número de requerimientos de conexión) desde un nodo fuente  $s$  a un nodo destino  $d$  mediante la longitud de onda  $w$ .

## VARIABLES DE DECISIÓN

$F_{ij}^{sdw}$  : Número de requerimientos de conexión desde un nodo fuente  $s$  a un nodo destino  $d$  utilizando el enlace  $ij$  y la longitud de onda  $w$ .

$\Lambda_{sd}$  : Denota el número de conexiones necesarias entre un nodo fuente  $s$  y un nodo destino  $d$ .

$$\text{Minimizar: } F_{max} \quad (2.1)$$

s.a.

$$F_{max} \geq \sum_{s,d,w} F_{max}^{sdw} \quad \forall ij \quad (2.2)$$

$$\sum_i F_{ij}^{sdw} - \sum_k F_{jk}^{sdw} = \begin{cases} -\lambda_{sdw} & si \quad s = j \\ \lambda_{sdw} & si \quad d = j \\ 0 & e.o.c \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\lambda_{sdw} \leq 1 \quad (2.4)$$

$$\sum_w \lambda_{sdw} = \Lambda_{sd} \quad (2.5)$$

$$F_{ij}^{sdw} \in (0, 1) \quad (2.6)$$

$$\sum_{s,d} F_{ij}^{sdw} \leq 1 \quad (2.7)$$

Este modelo también puede ser utilizado para obtener el número mínimo de longitudes de onda requeridas para un conjunto dado de requerimientos, realizando una búsqueda en el número mínimo de longitudes de onda en la red. Dado un número de longitudes de onda, se puede aplicar el modelo de PE para verificar si una solución puede ser encontrada. Si no se encuentra una solución, entonces se asigna un número mayor de longitudes de onda. Este proceso iterativo se realiza hasta que el número mínimo de longitudes de onda es encontrado. Se ha demostrado que esta propuesta tiene complejidad computacional NP-completa (Even et al. (1975)). El problema alternativo de maximizar el número de conexiones establecidas dado un número fijo de longitudes de onda y dada también una matriz de requerimientos también se puede formular como un problema de programación entera como se presenta a continuación:

### Conjuntos y Parámetros

- $P$  : Conjunto de canales.
- $n_{sd}$  : Número de pares fuente-destino.
- $l$  : Número de enlaces.
- $w$  : Número de longitudes de onda por enlace.
- $\rho$  : Número de solicitudes de conexión a ser ruteadas (Carga de la red).
- $a = (a_{ij})$  : Matriz  $P \times n_{sd}$  en donde  $a_{ij} = 1$  si el canal  $i$  está entre el par fuente-destino  $j$ ,  $a_{ij} = 0$  si no.
- $b = (b_{ij})$  : Matriz  $P \times L$  en donde  $b_{ij} = 1$  si el enlace  $j$  contiene al canal  $i$ ,  $b_{ij} = 0$  si no.

### Variables

$M = \{M_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n_{sd}$  : Número de conexiones establecidas por cada par fuente-destino  $i$ .

$Q = \{Q_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n_{sd}$  : Número de conexiones a asignar al par fuente-destino  $i$ .

$C = (C_{ij})$  : Matriz  $P \times w$  matriz de ruteo y asignación tal que  
 $C_{ij} = 1$  si la longitud de onda  $j$  es asignada al canal  $i$ ,  
 $C_{ij} = 0$  si no.

El objetivo del problema de ruteo y asignación de longitud de onda es maximizar el número de conexiones establecidas,  $C_0(p, q)$ . La formulación del modelo es la siguiente:

$$\text{Maximizar: } C_0(p, q) = \sum_{i=1}^{n_{sd}} M_i \quad (2.8)$$

s.a.

$$C^T b \leq l_{w \times l} \quad (2.9)$$

$$M \leq l_w C^T a \quad (2.10)$$

$$M_i \leq Q_i p \quad i = 1, 2, \dots, n_{sd} \quad (2.11)$$

$$M_i \geq 0, \text{ entero}, \quad i = 1, 2, \dots, n_{sd} \quad (2.12)$$

$$C_{ij} \in \{0, 1\} \quad i = 1, 2, \dots, P \quad j = 1, 2, \dots, w \quad (2.13)$$

La ecuación (2.8) da como resultado el número total de conexiones establecidas en la red. La ecuación (2.9) especifica que una longitud de onda puede ser utilizada máximo una vez en un enlace dado, donde  $l_{W \times L}$  es la matriz  $W \times L$  donde sus elementos son binarios. Las ecuaciones (2.10) y (2.11) aseguran que el número de conexiones establecidas sea menor al número de conexiones requeridas, donde  $l_w$  es la matriz  $l \times W$  donde sus elementos son binarios (Ramaswami y Sivarajan (1995)).

### **R&WA para redes con conversión de longitud de onda**

Para completar la discusión del problema R&WA se le añade la posibilidad de que las conexiones utilicen canales con conversión a lo largo de sus rutas. Esto es posible siempre y cuando se cuente con convertidores de longitud de onda que al recibir una transmisión con cierta longitud de onda la envíen con una nueva. Al tener una red con la capacidad de tener conversión de longitud de onda en cada uno de sus nodos sólo el problema de ruteo necesita una solución, ya que la asignación no tiene asociada ninguna restricción.

Notar que la conversión puede mejorar la eficiencia de la red ya que se resuelven los conflictos asociados a los canales que al transmitir datos se encuentran con que la longitud de onda que están utilizando en un enlace está ocupado en el siguiente. Dado esto, la conversión provee una cota inferior para el problema de R&WA. Siguiendo con la notación que se utilizó en el problema anterior, la formulación del modelo para redes con conversión es la siguiente:

$$\text{Minimizar: } F_{max} \quad (2.14)$$

s.a.

$$F_{max} \geq \sum_{s,d} F_{ij}^{sdw} \forall ij \quad (2.15)$$

$$\sum_i F_{ij}^{sdw} - \sum_k F_{jk}^{sdw} = \begin{cases} -\lambda_{sdw} & si \quad s = j \\ \lambda_{sdw} & si \quad d = j \\ 0 & e.o.c \end{cases} \quad (2.16)$$

En muchos casos la conversión de longitud de onda en la red no es preferida e incluso puede que no sea necesaria dados sus altos costos y sus limitadas ganancias. Es posible que se le aplique conversión a un subconjunto de los nodos o que los convertidores no puedan cambiar las longitudes de onda a cualquier parte del espectro. Para ver las soluciones que se proponen para este nuevo problema ver [Iness y Mukherjee \(1999\)](#).

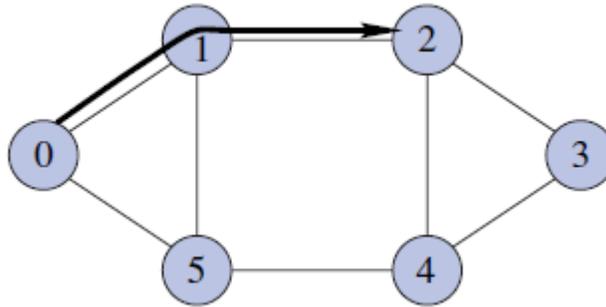
### 2.2.3. Modelos propuestos: Ruteo

Dado que el problema de ruteo y asignación de longitud de onda es un problema difícil de resolver se puede simplificar desagregando el problema en dos subproblemas separados: el subproblema de ruteo y el subproblema de asignación. A continuación se muestran varias formas propuestas en la literatura para resolver el subproblema de ruteo.

#### Ruteo Fijo

El enfoque más sencillo para asignar una ruta a una conexión es elegir siempre la misma ruta fija para un determinado par fuente-destino. Un ejemplo de tal enfoque es el enrutamiento mediante el camino más corto. La ruta más corta para cada par origen-destino se calcula off-line utilizando algoritmos tales como el algoritmo de Dijkstra o el algoritmo de Bellman-Ford, y cualquier conexión entre esos nodos deberá utilizar esa ruta fija. En la Figura 2.5 un ejemplo que muestra la ruta más corta entre el Nodo 0 y el nodo 2. Este

aproximamiento a las rutas de cada conexión es muy simple; pero, tiene la desventaja de que puede generar altas probabilidades de bloqueo en el caso de redes dinámicas, o en el caso estático puede generar un alto uso de longitudes de onda.

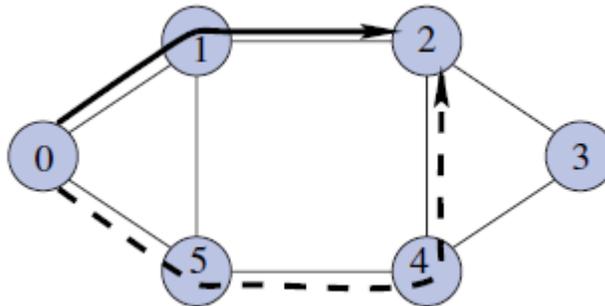


**Figura 2.5:** Ruta más corta desde el Nodo 0 al Nodo 2. Fuente: [Zang et al. \(2000\)](#)

### Ruteo Fijo-Alternativo

Una estrategia que considera múltiples rutas es el Ruteo Fijo-Alternativo. En este tipo de enrutamiento, cada nodo de la red tiene una matriz de enrutamiento que contiene una lista ordenada de una serie de rutas fijas a cada uno de los nodos de destino. Por ejemplo, estas rutas pueden incluir la ruta más corta, la segunda ruta más corta, la tercera ruta más corta, etc. Una ruta principal entre un nodo fuente  $s$  y un nodo de destino  $d$  se define como la primera ruta en la lista de rutas que conectaran al nodo  $d$  en la tabla de enrutamiento con el nodo  $s$ . Una ruta alternativa entre  $s$  y  $d$  es cualquier ruta que no comparte ningún enlace (enlaces disjuntos) con la ruta principal en la tabla de enrutamiento. El término rutas alternativas es también empleado para describir todas las rutas (incluyendo la ruta primaria) desde un nodo fuente a un nodo de destino. La Figura 2.6 ilustra una ruta primaria (línea continua) del nodo 0 al nodo 2, y una ruta alternativa (línea de trazos) desde el nodo 0 al nodo 2. Cuando hay un requerimiento de conexión, el nodo de origen intenta transmitir mediante cada una de las rutas de la tabla de ruteo en secuencia, hasta que una ruta con una asignación válida de longitud de onda se encuentra. Si no encuentra ninguna ruta disponible de la lista de rutas alternativas, la solicitud de conexión se bloquea y se pierde. En la mayoría de los casos, las tablas de enrutamiento en cada nodo están clasificadas por el número de enlaces (saltos) que hay entre el nodo fuente al nodo destino. Por lo tanto, el

camino más corto al destino es la primera ruta en la tabla de enrutamiento. Cuando hay igualdad en la distancia entre las diferentes rutas, una ruta puede ser seleccionada al azar. La estrategia de rutas fijas-alternativas ofrece simplicidad de control para asignar y descartar canales, y también se puede usar para ofrecer un cierto grado de nivel de servicio asociado a los fallos de los enlaces. Otra ventaja es que en relación a las rutas fijas esta estrategia puede reducir significativamente la probabilidad de bloqueo en las conexiones. Se ha demostrado también que teniendo tan solo dos rutas alternativas se tiene una probabilidad de bloqueo significativamente menor que si se tiene una red con ruteo fijo y con todos sus nodos capaces de hacer conversión de longitud de onda (Ramamurthy (1998)).

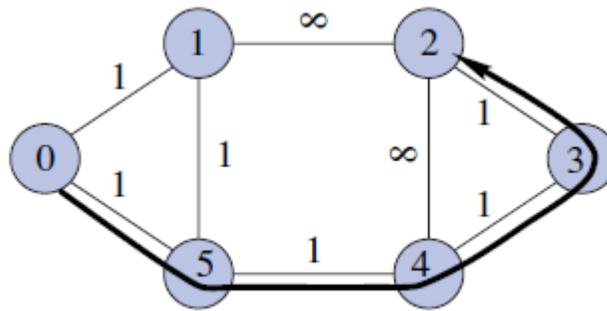


**Figura 2.6:** Ruta principal (línea continua) y ruta alternativa (línea punteada) desde el Nodo 0 al Nodo 2. Fuente: Zang et al. (2000)

### Ruteo Adaptativo

En el enrutamiento adaptativo, la ruta entre un nodo de origen a uno de destino se elige de forma dinámica, en función del estado de la red. Éste se determina por el conjunto de todas las conexiones que se encuentran actualmente en curso. Una forma de ruteo adaptativo es el shortest-cost-path routing o la ruta más corta y de menor costo, la cual tiene buenos resultados en las redes con conversión de longitud de onda. En este enfoque, cada enlace no utilizado en la red tiene un coste de 1 unidad, cada enlace utilizado en la red tiene un costo infinito, y cada enlace en el que pueda haber conversión de longitud de onda tiene un costo de  $c$  unidades. Si la conversión de longitud de onda no está disponible, entonces  $c = \infty$ . Cuando una conexión llega, se determina el camino más corto y de menor costo. Si hay múltiples rutas con la misma distancia, una de ellas se elige al azar. Escogiendo el coste  $c$ , asociado a la conversión de longitud de onda apropiadamente, se puede asegurar que los enlaces con conversión serán escogidos solamente cuando los enlaces de longitud de onda

continua no están disponibles. En este método, una conexión es bloqueada sólo cuando no hay una ruta (ya sea de longitud de onda continua o con capacidad de conversión) desde el nodo origen al nodo destino en la red. Una ventaja de esta estrategia es que tiene una menor probabilidad de bloqueo de conexión que las estrategias previamente presentadas; enrutamiento fijo y fijo-alternativo. Para la red en la Figura , si los enlaces (1, 2) y (4, 2) de la red están ocupados, entonces el algoritmo todavía puede establecer una conexión entre los nodos 0 y 2, mientras que las estrategia de enrutamiento fijo y enrutamiento fijo-alternativo bloquearían la conexión (Mokhtar y Azizoğlu (1998)).



**Figura 2.7:** Ruteo adaptativo desde el Nodo 0 al Nodo 2. Fuente: Zang et al. (2000)

#### 2.2.4. Redes Elásticas: R&SA Problem

Debido al continuo incremento de la demanda de ancho de banda, los proveedores de servicios de red (ISP) actualmente están aumentando la tasa de bits utilizados para transmitir información, llegando a utilizar 100[Gb/s] y 400[Gb/s] por longitud de onda. Para el esquema de transmisión mostrado anteriormente esto se convierte en un problema, debido a que transmitir señales con alta tasa de transmisión en enlaces con grandes distancias se vuelve muy difícil utilizando 50[GHz] de ancho espectral por longitud de onda. Este problema requiere mejorar la eficiencia espectral (porcentaje de espectro que se utiliza para transmitir información) flexibilizando y modificando los equipos de red con elementos que se puedan adaptar a las necesidades de tráfico actuales y futuras. Esta flexibilización permite introducir un nuevo paradigma de red, el cual permitiría a los ISP cumplir la necesidad de tráfico de sus usuarios. Este nuevo paradigma se conoce como Redes Ópticas Elásticas

(EON) estudiado por varios autores ([Monroy et al. \(2011\)](#); [Gerstel et al. \(2012\)](#); [Tomkos et al. \(2012\)](#); [Sambo et al. \(2012\)](#)). ) Las Redes Ópticas Elásticas se caracterizan por proveer elasticidad a la red flexibilizando 2 propiedades claves de la misma: primero el espectro óptico puede ser dividido flexiblemente; y segundo, los transeptores (dispositivo que tiene incorporado un transmisor y un receptor) pueden proveer rutas con tasa de transmisión variables. Esta elasticidad permitiría que la red tenga las siguientes características:

- La red podría transmitir demandas de tráfico superiores a los 100[Gb/s] (i.e. 400[Gb/s] o 1 [Tb/s]).
- Se utilizaría solo el ancho espectral necesario.
- Se podría buscar un equilibrio entre el alcance y el formato de modulación necesaria para transmitir, esto quiere decir que si se requiere enviar información por un enlace de corta distancia, se puede ajustar la transmisión a un formato de modulación que requiera menor ancho espectral e igualmente pueda transmitir sin errores para esa distancia.

### **Enrutamiento**

Para resolver el enrutamiento, normalmente se han usado dos hipótesis. La primera consiste en usar los caminos más cortos [Ash \(1997\)](#), [Keshav \(1997\)](#) ya que se considera que de esta forma se minimiza la utilización de recursos en comparación a utilizar rutas más largas. La segunda hipótesis consiste en seleccionar un conjunto de rutas que permita balancear lo mejor posible la carga que recibe cada enlace de la red [Van Parys et al. \(1998\)](#) [Teng y Rouskas \(2005\)](#), pues se supone que de esta forma se disminuye la probabilidad de bloqueo, probabilidad de que una conexión no llegue al nodo de destino, en redes dinámicas. Debido a estas consideraciones, con posterioridad han aparecido numerosos artículos sobre el problema haciendo uso de estas 2 hipótesis descritas en el párrafo anterior. Este método conjunto, llamado rutas más cortas que balancean la carga o SPBR por sus siglas en inglés, ha sido el más utilizado para generar el enrutamiento. Sin embargo esta hipótesis presenta dos problemas. Primero, la estrategia de balancear la carga asume que todos los enlaces de la red tienen asociados el mismo número de longitudes de onda, algo que raramente

ocurre en redes reales. Bajo esta suposición no es sorprendente que el método SPBR obtenga una probabilidad de bloqueo menor que otros métodos de ruteamiento, porque si un enlace recibe más carga de tráfico que el resto, este necesariamente presentará una mayor probabilidad de bloqueo, lo cual en consecuencia determinará la probabilidad de bloqueo de la red. Segundo, la asignación de rutas y la asignación de longitud de onda comúnmente se resuelven por separado. Esto permite obtener buenas soluciones locales para ambos problemas, pero pierde la oportunidad de encontrar una buena solución global al resolverlos simultáneamente. De hecho, recientemente en el contexto de redes con conversión de longitud de onda, en [Vallejos y Jara \(2014\)](#) se aplicó una estrategia global, donde se propuso un método llamado CPR (Cheapest Path Routing) cuyo desempeño fue mejor que el de los métodos que usan estrategias locales.

### **Asignación de longitudes de onda**

Para resolver el problema de asignación de longitudes de onda, la estrategia más utilizada consiste en asignar el mismo número de longitudes de onda a cada enlace de la red, la cual normalmente se determina por medio de simulaciones como las presentadas en [Zapata-Beghelli y Bayvel \(2008\)](#), [Chlamtac et al. \(1992\)](#). Si bien esta es una estrategia simple, a continuación se explica por qué ella lleva a sobredimensionar la red. Tal como ya se dijo, no es posible balancear completamente la red. En consecuencia, el dimensionamiento debe ser tal que el enlace que recibe más carga pueda cumplir con la probabilidad de bloqueo requerida. Esto, sumado a la política de dimensionamiento homogéneo (a todos los enlaces se les asigna el mismo número de longitudes de onda) es la causa de que algunos enlaces queden sobredimensionados, lo que a su vez encarece innecesariamente la red. Existe un gran número de métodos para asignar las longitudes de onda de cada conexión, entre ellos se encuentran; Shortest Path-First Fit (SP-FF) presentado en [Chlamtac et al. \(1992\)](#), Adaptive Unconstrained Routing - Exhaustive en [Mokhtar y Azizoglu \(1998\)](#) y k-Alternate Paths using Shortest Path por [Zapata-Beghelli y Bayvel \(2008\)](#), entre otros.

### **Asignación de Espectro**

Existen 2 enfoques comúnmente utilizados para resolver este problema: En el enfoque estático las conexiones son establecidas permanentemente y el principal objetivo es minimizar el uso de espectro; en el enfoque dinámico las conexiones son establecidas solo cuando se requiere por lo que su principal objetivo es minimizar el número de solicitudes bloqueadas. Respecto a los métodos de asignación de espectro, los más utilizados en la literatura son Random Fit (RF) y First-Fit (FF). Random Fit asigna el espectro aleatoriamente, lo que lleva a una alta fragmentación del espectro (espacios sin uso del espectro). Por otro lado First Fit, asigna el espectro de forma ordenada (se asigna la primera porción de espectro disponible). La debilidad de estos métodos radica en que a pesar de ser computacionalmente simples, limitan su búsqueda a las rutas obtenidas previamente a su ejecución. Como resultado no aprovechan la multiplexación estadística que se puede obtener al resolver ambos problemas (ruteo y asignación de espectro) simultáneamente. Para más información ver [Wang et al. \(2012\)](#), [Yin et al. \(2013\)](#).

## 3 | Metodología

En esta sección se presenta en detalle el problema a resolver, describiendo las principales características de la topología utilizada y sus implicancias. Se muestra también la metodología de resolución, la cual consiste en un modelo de programación entera el cual genera resultados óptimos para luego dar paso a una estrategia llamada Shortest Path-Optimal Assignment basada en una heurística para generar el ruteo, y en el modelo de programación entera para la asignación de espectro.

### 3.1. Modelo de Programación Entera

En primera instancia se aborda el problema de ruteo y asignación de espectro en redes ópticas elásticas mediante un modelo de programación entera, el cual define de manera conjunta qué ruta y qué porción de espectro deben utilizar las conexiones con el fin de minimizar el costo total de la red. A diferencia del problema de ruteo y asignación de longitud de ondas, el ancho de un frequency slot en una malla elástica es variable, y depende netamente del requerimiento de la conexión que usará ese canal. Dado que se usará un modelo de programación entera, se divide el espectro en unidades indivisibles de frecuencia contiguas, con un ancho apropiado, por ejemplo, 12.5[GHz]. A esta unidad de medida se le llamará Frequency Slot Unit (FSU), y permitirá asignar FS de poco ancho espectral a los requerimientos de bit rates bajos, mientras que si se tiene un requerimiento de bit rate alto (i.e. 1[Tb/s]) sólo se le deberá asignar una mayor cantidad de FSU. Es importante destacar que a mayor elasticidad de la red existirá un mayor costo computacional debido al crecimiento en el número de variables que se generan al tener FSU muy pequeños. Recordar también que este modelo está hecho específicamente para una red óptica con topología de

anillo, lo cual simplifica el problema de ruteo ya que todas las conexiones deben escoger una de dos rutas posibles; la ruta horaria o la ruta antihoraria.

### 3.1.1. Conjuntos

$\mathcal{N}$  : Conjunto de Nodos de la red, con  $n \in \mathcal{N}$ .

$\mathcal{L}$  : Conjunto de enlaces de la red, con  $(i, j) \in \mathcal{L}$ . En este caso, al ser topología de anillo, uniendo cada par de nodos hay 2 enlaces bidireccionales.

$\mathcal{C}$  : Conjunto de los requerimientos de conexión de la red, con  $(u, v) \in \mathcal{C}$ .

Como se puede apreciar, existen tres conjuntos en el modelo. El conjunto de nodos  $\mathcal{N}$  sirve para dimensionar la red, y su cardinalidad, para efectos prácticos, se definirá como  $|\mathcal{N}| = N$ . En el caso del conjunto de enlaces  $\mathcal{L}$  se tiene que para cada par de nodos consecutivos  $(i, j)$  existen dos enlaces  $(u, v) \wedge (v, u)$  los cuales los conectan en los sentidos horario y antihorario. Además, definiendo su cardinalidad con respecto a  $N$  quedaría:  $|\mathcal{L}| = 2N$ . Finalmente,  $\mathcal{C}$  denota el conjunto de conexiones de la red. Dado que la red es de tipo anillo cualquier nodo de la red se puede conectar con cualquier otro nodo, por lo tanto la cardinalidad de este conjunto es  $|\mathcal{C}| = N * (N - 1)$ .

### 3.1.2. Parámetros

- $K_{i,j}$  : Número de rutas que unen los nodos  $(i, j)$ , con  $(i, j) \in C$ . En este caso, al ser de topología anillo, se fija en 2 para todas las conexiones, una ruta en cada sentido.
- $P_{u,v}$  : Disponibilidad de FSU en el enlace  $(u, v) \in \mathcal{L}$ . Se fija siempre con cierta holgura y el modelo indica finalmente cuántos FSU se utilizarán en cada enlace.
- $D_{i,j,k,u,v}$  : Parámetro binario que toma el valor 1 si la ruta  $k$  que une los nodos  $(i, j)$  utiliza el enlace  $(u, v)$ .
- $A_{i,j}$  : Parámetro que indica cuántos FSU se deben reservar para la conexión  $(i, j)$ . Denotando el ancho espectral de la conexión  $(i, j)$  como  $Ancho_{i,j}$  y  $FSU$  al ancho espectral de un frequency slot unit se define:
- $$A_{i,j} = \left\lceil \frac{Ancho_{i,j}}{FSU} \right\rceil.$$

### 3.1.3. Variables de decisión

- $\alpha_{i,j,k}$  : Variable binaria que toma valor 1 si la ruta  $k$  que une los nodos  $(i, j)$  se usa, o 0 sino.
- $\beta_{i,j,u,v,p}$  : Variable binaria que toma valor 1 si la conexión  $(i, j)$  utiliza el frequency slot unit  $p$  en el enlace  $(u, v)$ , o 0 sino.
- $\gamma_{u,v,p}$  : Variable binaria que toma valor 1 si el FSU  $p$  del enlace  $(u, v)$  ha sido utilizado, o 0 sino.
- $Nl_{u,v}$  : Variable que indica cuál fue el último FSU utilizado en el enlace  $(u, v)$ .

La primera variable mostrada tiene por propósito precisar la ruta que se utilizará para cada conexión  $(i, j)$ , ya sea ruta horaria o anti-horaria. Los valores óptimos tomados por dichas variables servirán para analizar si el modelo tiende a distribuir la carga, enviando similar cantidad de conexiones para cada ruta, o si tiende a escoger cierta ruta por sobre la otra. Por otro lado se tienen las variables que definen la asignación de espectro para cada enlace. El espectro continuo de cada enlace se divide en una malla dividida en  $P$  canales de igual frecuencia, cada uno disponible para ser asignado a sólo una conexión.

### 3.1.4. Función objetivo

$$\text{Min} \sum_{(u,v) \in \mathcal{L}} Nl_{u,v} \quad (3.1)$$

La función objetivo propuesta en (3.1) minimiza el costo total de la red caracterizado como la suma de los  $Nl$  de cada enlace, variable que indica cuál fue el último FSU utilizado en el enlace  $(u, v)$ .

### 3.1.5. Restricciones del modelo

$$\sum_{k=1}^{K_{i,j}} \alpha_{i,j,k} = 1 \quad \forall (i, j) \in \mathcal{C} \quad (3.2)$$

La restricción (3.2) impone escoger sólo una de las rutas propuestas para cada conexión  $(i, j)$ .

$$\sum_{p=1}^{P_{u,v}} \beta_{i,j,u,v,p} = \sum_{k=1}^{K_{i,j}} D_{i,j,k,u,v} * \alpha_{i,j,k} * A_{i,j} \quad (i, j) \in \mathcal{C}, \quad (u, v) \in \mathcal{L} \quad (3.3)$$

La restricción (3.3) impone que cada conexión  $(i, j)$  utilice una cantidad de FSU igual a  $A_{i,j}$  en cada enlace de la ruta escogida, logrando así reservar la capacidad que requiere cada conexión para ser atendida.

$$1 - \beta_{i,j,u,v,p} \geq \beta_{i,j,u,v,r} \quad (i, j) \in \mathcal{C} \quad (u, v) \in \mathcal{L} \quad p \neq r \in P \quad (3.4)$$

La restricción (3.4) permite que, aparte de que cada conexión tenga la misma cantidad de FSU en todos los enlaces de su ruta, éstos sean iguales entre cada enlace de la misma, es decir, se logra la no conversión de longitud de onda exigida por el problema. De esta manera si a una conexión  $(i, j)$  se le asigna el FSU  $p$ , todos los FSU  $r$  que están fuera del ancho de la conexión se hacen cero. Para esto, se restringe el dominio de  $r$  a:  $r \in [1, \max\{1; p - A_{i,j}\}] \cup [\min\{p + A_{i,j}; P_{x,y}\}, P_{x,y}]$ .

$$\beta_{i,j,u,v,p} \leq \beta_{i,j,x,y,p} + \left( 1 - \sum_{k=1}^{K_{i,j}} D_{i,j,k,x,y} * \alpha_{i,j,k} \right) \quad (i, j) \in \mathcal{C} \quad (u, v) \neq (x, y) \in \mathcal{L} \quad p \in P \quad (3.5)$$

La restricción (3.5) logra que para cada conexión  $(i, j)$  se utilicen FSU que sean contiguos en todos los enlaces  $(u, v)$  pertenecientes a su ruta. De esta manera se logra que el envío no se fragmente en distintos canales.

$$\gamma_{u,v,p} = \sum_{(i,j) \in \mathcal{C}} \beta_{i,j,u,v,p} \leq 1 \quad (u, v) \in \mathcal{L} \quad p \in P \quad (3.6)$$

Por su parte, la restricción (3.6) impide que un FSU sea utilizado por más de una conexión  $(i, j)$ .

$$Nl_{u,v} \geq p * \gamma_{u,v,p} \quad (u,v) \in \mathcal{L} \quad p \in P \quad (3.7)$$

Finalmente, la restricción (3.7) indica que  $Nl_{u,v}$  quedará definido por el último FSU utilizado. Cabe destacar que esta variable no hace cuenta de la cantidad de FSU utilizados en los enlaces, sino tomará su valor según el último FSU utilizado. Por ejemplo, si el enlace  $(u,v)$  utiliza sólo el FSU veinte, entonces su  $Nl_{u,v}$  será igual a veinte sin importar que los anteriores no hayan sido utilizados.

En resumen, el modelo propuesto resulta ser uno de programación entera y corresponde a:

$$\text{Min} \sum_{(u,v) \in \mathcal{L}} Nl_{u,v}$$

s.a.

$$\sum_{k=1}^{K_{i,j}} \alpha_{i,j,k} = 1 \quad \forall (i,j) \in \mathcal{C}$$

$$\sum_{p=1}^{P_{u,v}} \beta_{i,j,u,v,p} = \sum_{k=1}^{K_{i,j}} D_{i,j,k,u,v} * \alpha_{i,j,k} * A_{i,j} \quad (i,j) \in \mathcal{C}, \quad (u,v) \in \mathcal{L}$$

$$1 - \beta_{i,j,u,v,p} \geq \beta_{i,j,u,v,r} \quad (i,j) \in \mathcal{C} \quad (u,v) \in \mathcal{L} \quad p \neq r \in P$$

$$\beta_{i,j,u,v,p} \leq \beta_{i,j,x,y,p} + \left(1 - \sum_{k=1}^{K_{i,j}} D_{i,j,k,x,y} * \alpha_{i,j,k}\right) \quad (i,j) \in \mathcal{C} \quad (u,v) \neq (x,y) \in \mathcal{L} \quad p \in P$$

$$\gamma_{u,v,p} = \sum_{(i,j) \in \mathcal{C}} \beta_{i,j,u,v,p} \leq 1 \quad (u,v) \in \mathcal{L} \quad p \in P$$

$$Nl_{u,v} \geq p * \gamma_{u,v,p} \quad (u,v) \in \mathcal{L} \quad p \in P$$

## 3.2. Estrategia de resolución: Shortest Path-Optimal Assignment (SP-OA)

Dada la naturaleza del problema, el modelo de programación entera que se presentó anteriormente tiene complejidad computacional NP-Complete, lo que genera que a medida que se van añadiendo nodos a la red la cantidad de variables y restricciones aumenta de manera exponencial como muestra la Tabla 4.1. Dado esto, si bien el modelo resuelve a optimalidad el problema conjunto, resulta complicado resolver instancias de gran tamaño. Es por eso que se propone una estrategia que combine una heurística que genere las rutas y luego permitir que el modelo entregue como resultado la asignación de espectro para cada conexión. Dado que la red tiene topología de anillo sólo existen dos posibles rutas para conectar cualquier par de nodos.

### Algoritmo de Dijkstra

Para definir qué ruta utilizará cada conexión se hace uso del algoritmo de Dijkstra, llamado también algoritmo de caminos mínimos, el cual sirve para determinar la ruta más corta dado un nodo de origen para el resto de los nodos en un grafo con pesos en cada enlace. En este caso en particular, se les asigna a todos los enlaces un peso unitario, igual en todos los enlaces, lo que se traduce en que la ruta escogida será la que genere menor cantidad de pasos por enlaces. Una hipótesis fundada en el tipo de topología en estudio es que, en el óptimo, la mayoría de las rutas escogidas coincidirán con la ruta más corta. Es muy poco probable que una matriz de ruteo óptima contenga una mayor cantidad de rutas largas que rutas cortas.

### Modelo de asignación óptima

Una vez fijadas las rutas se procede a ejecutar el modelo de asignación óptima, con lo cual cada conexión, aparte de saber por qué ruta se debe comunicar, sabrá con exactitud qué porción del espectro electromagnético tendrá que utilizar con el fin de no tener cortes en la comunicación, dados por la superposición de demandas de distintas conexiones en un mismo canal, y con el fin también de minimizar los costos asociados a esa conexión. Dado esto, si bien se sabe que fijando las rutas mediante esta estrategia se perderá optimalidad, es importante ver cuánto tiempo se gana utilizando este modelo combinado y medir cuánto se aleja la solución propuesta del óptimo.

A modo de resumen, los pasos a seguir para ejecutar la estrategia propuesta son:

### Estrategia de resolución

- Paso 0:** Determinar qué valor tomará el parámetro  $A_{i,j}$  asociado a cada conexión de la red. Esto se hace sacando el cajón superior de la división entre el ancho espectral requerido por la conexión entre  $(i, j)$  con el ancho espectral que se definirá como la unidad mínima de frecuencia o  $FSU$ .
- Paso 1:** Una vez asignados los parámetros  $A_{i,j}$  aplicar el Algoritmo de Dijkstra a la red para encontrar la matriz de rutas.
- Paso 2:** Asignar valores a la variable  $\alpha_{i,j,k}$  en relación a lo obtenido en la matriz de ruteo. Si la conexión  $(i, j)$  se realiza mediante la ruta horaria, entonces el  $\alpha_{i,j,1}$  tomará el valor 1 mientras que el  $\alpha_{i,j,2}$  tomará el valor 0.
- Paso 3:** Hecho esto ejecutar el modelo de programación entera para obtener la asignación de espectro para cada conexión, la cual indicará mediante la variable  $\beta_{i,j,u,v,p}$  si la conexión  $(i, j)$  utiliza el canal  $p$  del enlace  $(u, v)$ .

## 4 | Resultados

### 4.1. Descripción

En esta sección se explica el método para la generación de instancias y se muestran los resultados obtenidos al resolver el problema tanto con el modelo de programación entera como con la estrategia descrita en la sección 3.2.

### 4.2. Generación de Instancias

Para comprobar el funcionamiento de la estrategia propuesta se generan dos tipos de instancias. La instancia tipo 1 supone que las conexiones que tienen menor largo, entendiendo por largo a la cantidad de enlaces recorridos, requieren tasas de transmisión mayores, y por ende una mayor cantidad de FSU mientras que la instancia tipo 2 es el caso contrario; se asignan tasas de transmisión más altas a las conexiones de mayor largo. Como paso previo para aplicar la heurística del camino mas corto se debe calcular el parámetro  $A_{i,j}$  el cual indica la cantidad de FSU que requiere cada conexión. Para esto se realiza lo siguiente:

- Para cada  $(i, j) \in C$  se cuantifica la distancia que recorre la conexión al utilizar la ruta más corta.
- En el caso de la instancia tipo 1, se ordenan las conexiones según su largo de mayor a menor y a las de mayor largo se les asigna 1 FSU, luego a las que recorren un enlace menos se les asignan 2 FSU y así continuamente hasta asignarle un ancho a todas las conexiones.
- En el caso de la instancia tipo 2 el número de FSU asignados a la conexión  $(A_{i,j})$  es igual a la cantidad de enlaces que se recorren por la ruta escogida.

Nodos	Instancia	Variables	Restricciones
5	Tipo 1	1100	13570
	Tipo 2	1310	17400
6	Tipo 1	3420	42834
	Tipo 2	4164	82290
7	Tipo 1	6720	98112
	Tipo 2	9128	133560
8	Tipo 1	16544	483864
	Tipo 2	23840	901016
9	Tipo 1	39582	1720190
	Tipo 2	-	-
10	Tipo 1	69360	3632730
	Tipo 2	-	-

**Tabla 4.1:** Número de variables y restricciones según cantidad de nodos de la red.

### 4.3. Métrica: Fragmentación Relativa al Costo

Con el fin de medir cuánto se aleja el resultado obtenido del óptimo, se genera una métrica llamada Fragmentación Relativa al Costo (FRC), la cual se define a continuación:

$$FRC = \frac{FSU_{inutilizados}}{\sum_{(u,v) \in \mathcal{L}} N_{u,v}} \quad (4.1)$$

La FRC es una métrica que da como resultado una cota superior a la lejanía con respecto al resultado óptimo midiendo la fragmentación del espectro con respecto al costo total de la red. Se entiende como una red fragmentada a una red que, luego de completar el ruteo y asignación de espectro, se tenga al menos un canal en cualquiera de sus enlaces que no haya sido utilizado. Una explicación más detallada se presenta más adelante. Entonces, habiendo definido la fragmentación de una red, y recordando que el costo total de la red corresponde a la suma de los canales asignados a cada enlace, sin importar si éstos fueron totalmente utilizados o no, resulta trivial pensar que a menor fragmentación de la red menor será el costo total de la misma. En el caso de que exista un resultado donde no exista fragmentación, se puede asegurar que ese resultado generó una asignación

óptima del espectro. Pero no siempre es factible no tener fragmentación. Dadas las características del problema y sus restricciones, resulta que para distintas cantidades de nodos, el resultado óptimo tiene cierto grado de fragmentación. Un ejemplo de este caso se muestra en la Figura 4.1, donde se puede ver de manera gráfica la distribución de las conexiones en distintos canales, resuelto a optimalidad, pero generando un grado de fragmentación. Si para un enlace el canal, o pista como se le llama en la figura, no está coloreado quiere decir que ninguna conexión lo utiliza. En este caso se tiene que para el enlace 1,5 el primer canal no está siendo utilizado por ninguna conexión, generando así que el número de  $FSU_{inutilizados}$  de esa red sea igual a uno.

Por otro lado, en el caso de que la FRC sea cero, se puede asegurar que el valor de la función objetivo es el óptimo para la red en cuestión ya que no existe fragmentación de la red. Por lo tanto, esta metrica se comporta como un limite superior (LS). Si éste es cero se puede asegurar que el resultado es óptimo. En el caso de que no sea cero se puede establecer que lo más lejos que se puede estar del óptimo es en un FRC % teniendo así una buena forma de medir la eficiencia de los diferentes métodos.

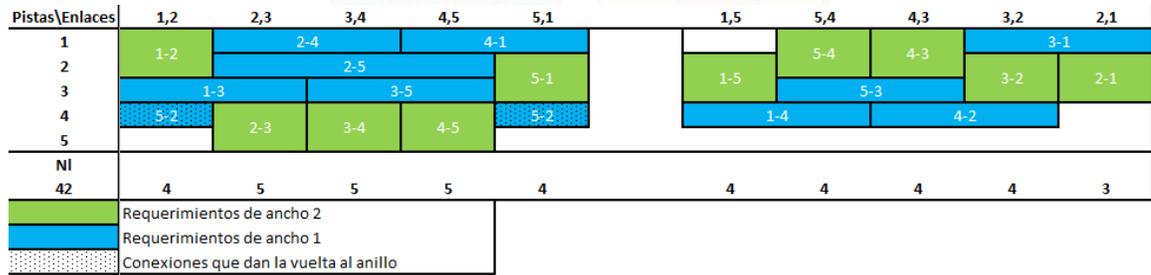
## 4.4. Resultados Computacionales

El modelo fue programado en lenguaje computacional AMPL y resuelto por el solver CPLEX 12.4.0.0 en un computador con un procesador Intel Core i7 de 4.00[GHz] y 32[Gb] de RAM. A las instancias resueltas mediante el método Shortest Path-Optimal Assignment se les restringió el tiempo de resolución a un máximo de 6 horas. En la práctica el modelo se podría correr por aún más tiempo buscando resultados más cercanos al óptimo ya que el presente artículo no está dirigido para redes ópticas dinámicas (On Line) sino estáticas (Off Line), en las cuales se asignan los canales a priori para cada conexión.

### 4.4.1. Resultados mediante Modelo de PE

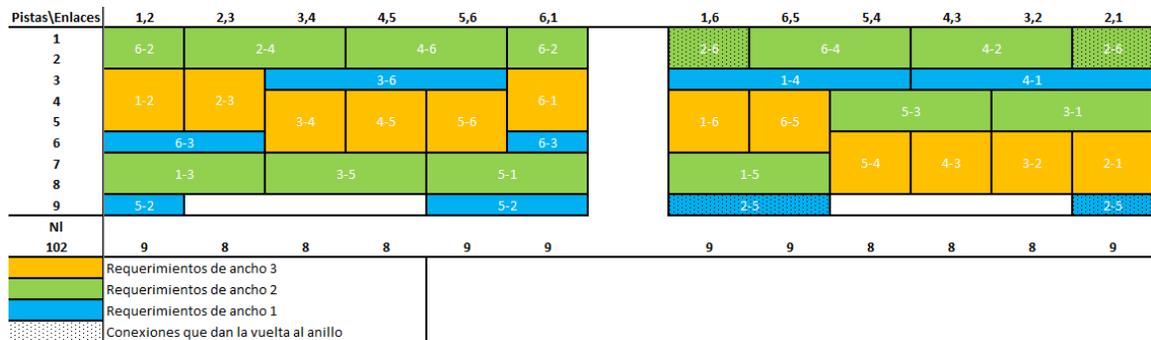
A continuación, se presentan de manera gráfica los resultados obtenidos por el modelo de programación entera para redes ópticas desde 5 nodos hasta 8 nodos. Se destaca que estos resultados son los óptimos, y no se llegó hasta redes de mayor cantidad de nodos debido a que el modelo no convergía al óptimo en tiempos razonables (hasta 24 horas).

En la Figura 4.1, se tiene el ruteo y asignación para una red con 5 nodos, lo que implica que hay  $N * (N - 1) = 20$  conexiones. Además la instancia es tipo 1, es decir que las conexiones más largas tienen menor ancho espectral. Se puede apreciar que sólo en la conexión (2, 5) se escogió la ruta más larga, es decir en un 5 % de las conexiones totales, ya que ocupa los enlaces (2, 3) – (3, 4) – (4, 5) en vez de su contraparte (2, 1) – (1, 5). Además se puede apreciar que existe fragmentación debido a que no se ocupa el primer FSU del enlace (1, 5). El costo total de la red asciende a  $N_l = 42$ .



**Figura 4.1:** Ruteo y Asignación de Espectro de una red con 5 nodos, resuelta a optimalidad, para una instancia tipo 1 (conexiones mas largas, menor ancho espectral).

En el caso de una red con 6 nodos se puede apreciar en la Figura 4.2 que no existe fragmentación del espectro ya que todos los FSU fueron utilizados sin dejar agujeros en la malla. Por otra parte no existe ninguna conexión que haya utilizado la ruta más larga, dando como resultado un costo total de  $N_l = 102$ .



**Figura 4.2:** Ruteo y Asignación de Espectro de una red con 6 nodos, resuelta a optimalidad, para una instancia tipo 1 (conexiones mas largas, menor ancho espectral).

Para una red con 7 nodos, Figura 4.3, también se da el caso de que siempre el modelo escoge la ruta más corta. Además, tenemos como resultado una malla sin fragmentación con un costo total de  $N_l = 140$ .

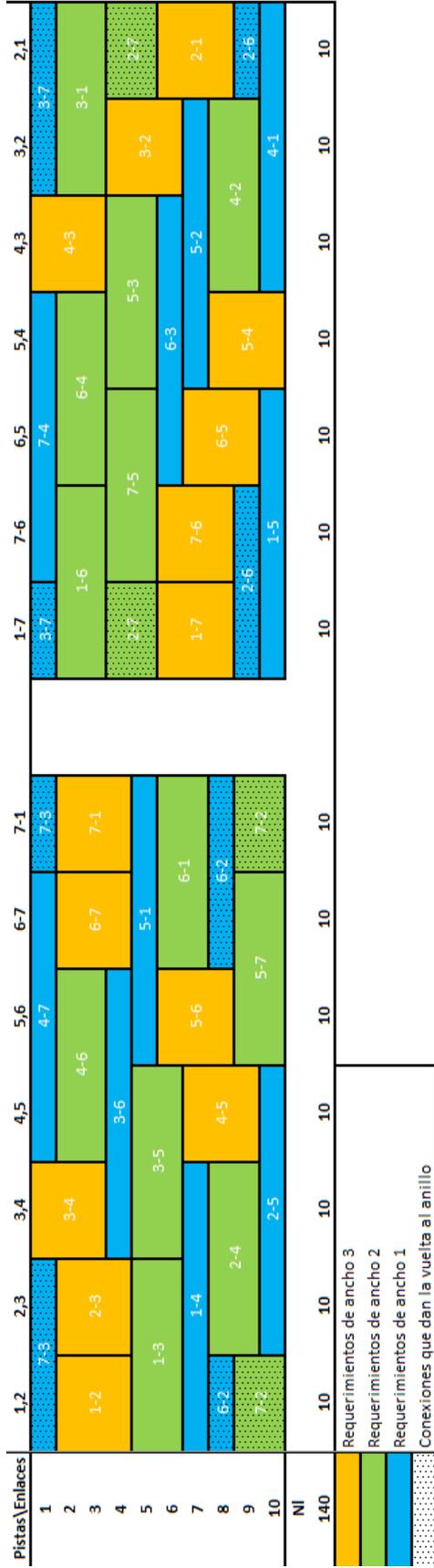


Figura 4.3: Ruteo y Asignación de Espectro de una red con 7 nodos, resuelta a optimalidad, para una instancia tipo 1 (conexiones mas largas, menor ancho espectral).

En la Figura 4.4, se tiene una red con 8 nodos en donde también se tienen realizadas todas las conexiones mediante la ruta más corta. Además, no existe fragmentación del espectro, dando así un costo total de la red de  $N_l = 288$

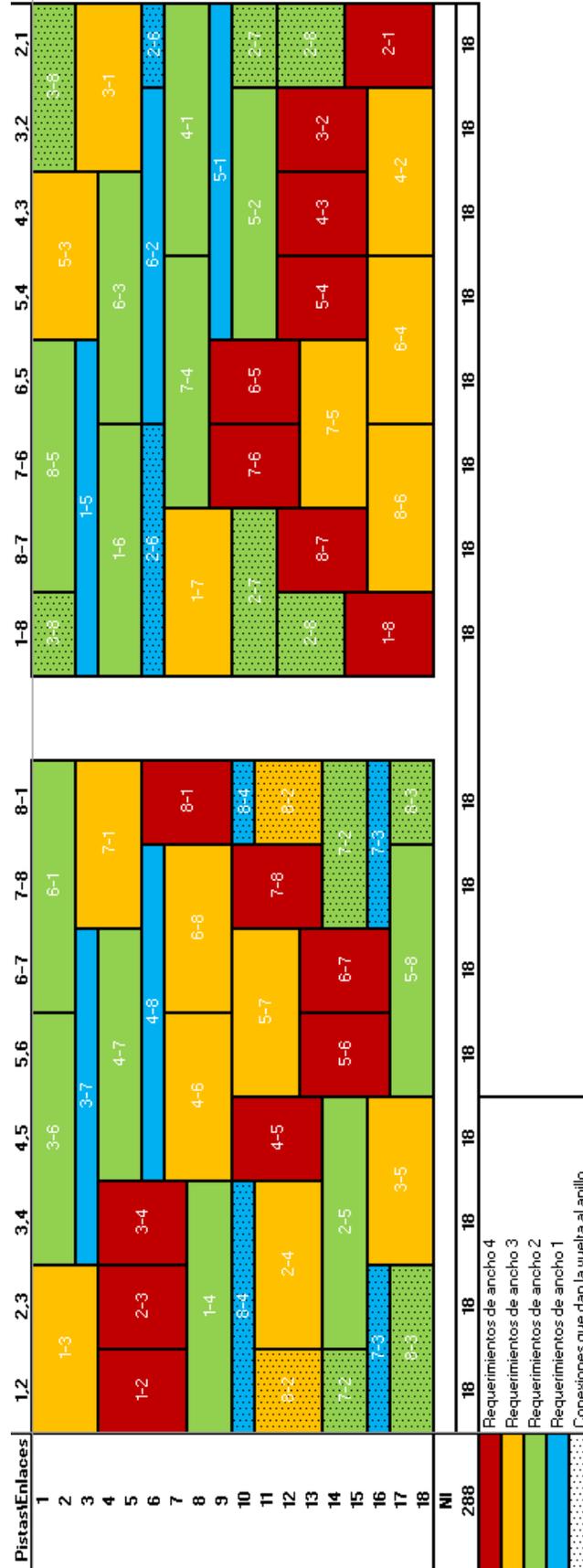
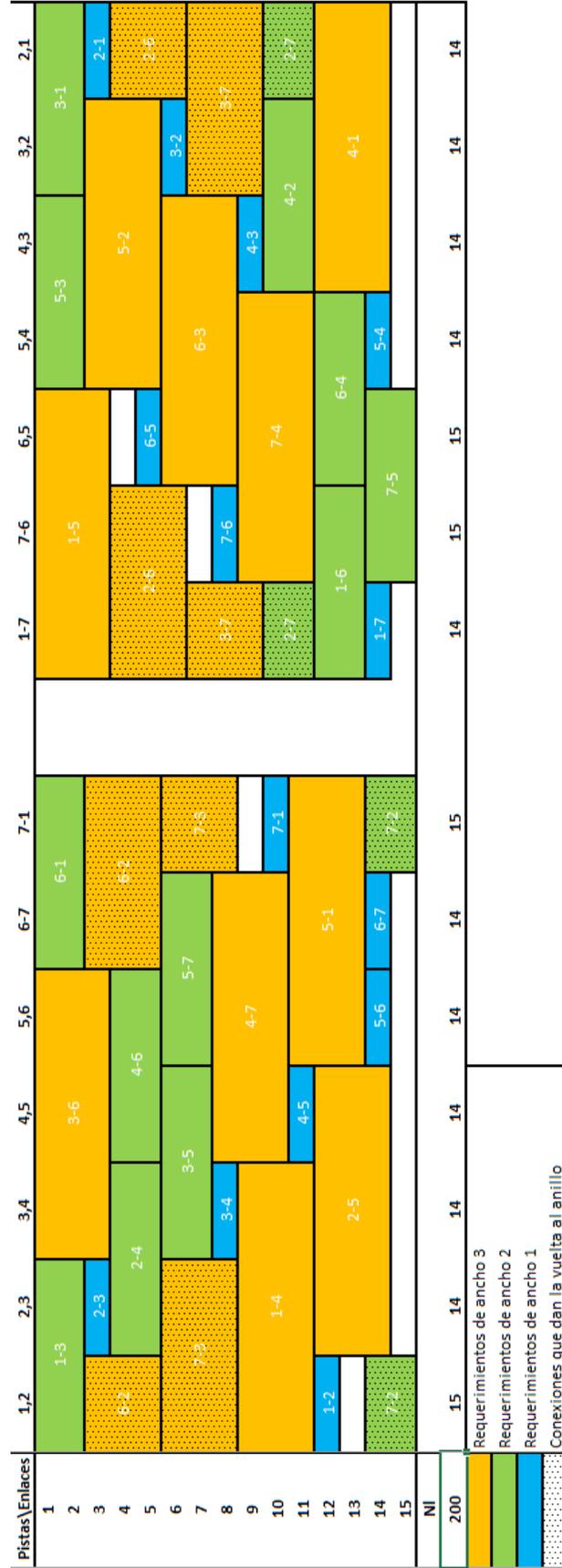


Figura 4.4: Ruteo y Asignación de Espectro de una red con 8 nodos, resuelta a optimalidad, para una instancia tipo 1 (conexiones mas largas, menor ancho espectral).

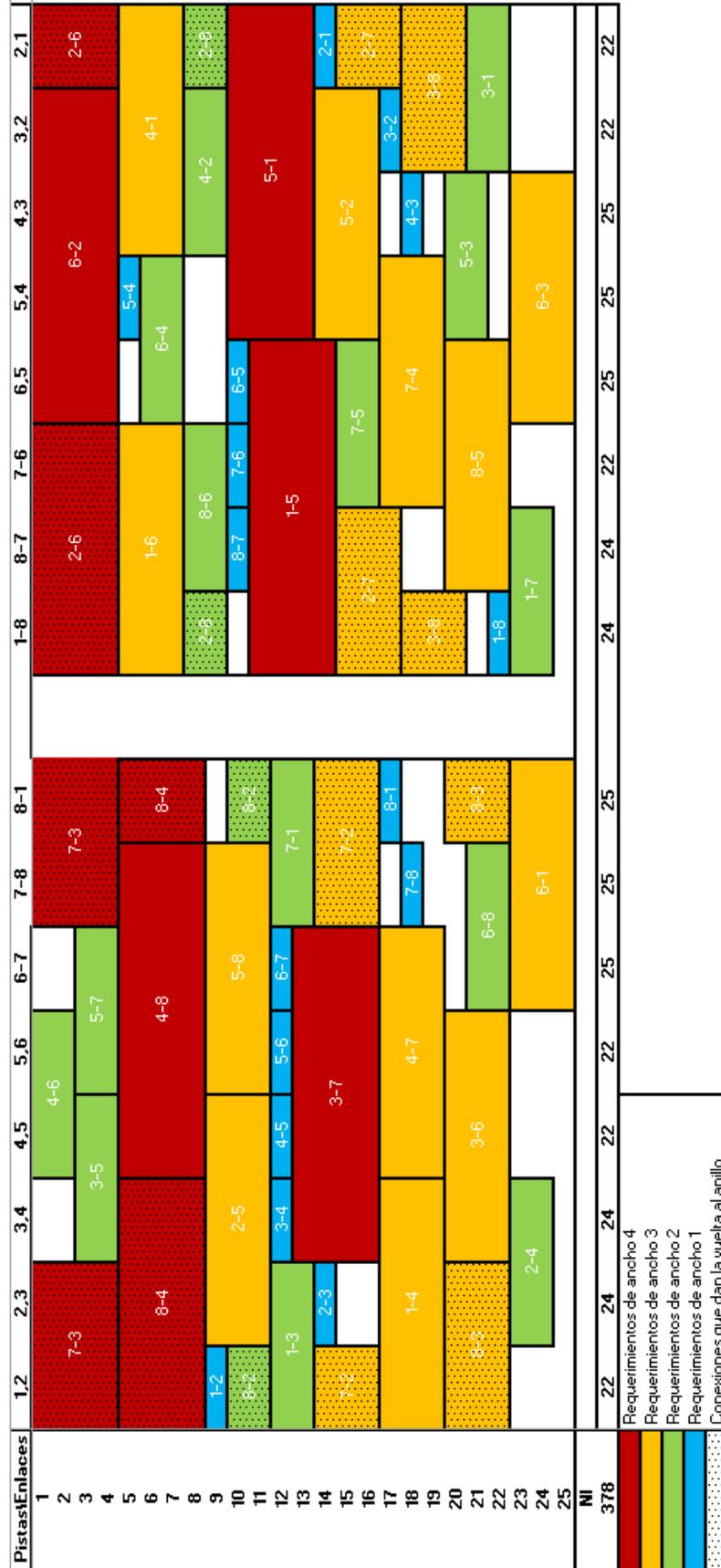


Para una red con 7 nodos y donde las conexiones más largas requieren mayor ancho espectral da como resultado una red fragmentada en los enlaces (1, 2) – (7, 1) – (7, 6) – (6, 5) como muestra la Figura 4.7. Además, no utiliza en ninguna ocasión la ruta más larga. El costo total asociado a esta red es de  $N_l = 200$ .



**Figura 4.7:** Ruteo y Asignación de Espectro de una red con 7 nodos, resulta a optimalidad, para una instancia tipo 2 (conexiones mas largas, mayor ancho espectral).

Finalmente, para el caso de una red con 8 nodos en una instancia del tipo 2, se tiene una red con alta fragmentación debido a la pérdida de grados de libertad al tener requerimientos que necesitan hasta 4 FSU de ancho y 4 enlaces de largo. Además se puede apreciar en la Figura 4.8 que ninguna conexión se realizó mediante la ruta más larga y el costo total de la red fue de  $N_l = 378$ .



**Figura 4.8:** Ruteo y Asignación de Espectro de una red con 8 nodos, resuelta a optimalidad, para una instancia tipo 2 (conexiones mas largas, mayor ancho espectral).

### 4.4.2. Resultados mediante SPOA

Luego de haber visto los resultados obtenidos mediante el modelo de programación entera, el cual resuelve el problema conjunto de ruteo y asignación, aún cuando existen muy pocas instancias resueltas se da siempre que de la totalidad de las conexiones, máximo una tiende a no escoger la ruta más corta. Dado esto, se ratifica el criterio de fijar las rutas a priori para relajar el modelo de programación entera, y estas rutas siempre serán las que resulten de la aplicación del algoritmo de Dijkstra (rutas más cortas). Entonces, habiendo fijado las rutas pertenecientes a cada instancia, se procede a aplicar el modelo de programación entera para generar la asignación de espectro.

Dado que se tienen muy pocas instancias como para afirmar que siempre la ruta más corta será la que genere menores costos a la red, es que cobra importancia la generación de una métrica que asigne una cota superior a la distancia con respecto al óptimo. Los resultados de costos de cada red, la métrica, los tiempos de resolución y la comparación con respecto a la heurística más utilizada para el ruteo y asignación de espectro se muestran en la Tabla 4.2 y Tabla 4.3.

## 4.5. Análisis de Resultados

En las Tablas 4.2 y 4.3 se muestran los resultados computacionales de la resolución de las instancias tipo 1 y tipo 2. Se usaron tres métodos de resolución. Primero, se utiliza el modelo presentado en la Sección 3, donde el problema de ruteo y asignación se resuelve a optimalidad. Luego, se resuelve utilizando la estrategia en dos etapas propuesta en este artículo para terminar resolviendo el problema mediante la heurística más utilizada en la literatura, el Shortest Path-First Fit (SP-FF). En la tabla, se muestran además los tiempos de resolución (con excepción de los tiempos del SP-FF por ser tan bajos), el resultado de la métrica FRC y la mejora porcentual de los métodos utilizados en comparación al SP-FF.

Dada la naturaleza de las instancias escogidas, en las que a medida que se agregan nodos a la red las conexiones requieren canales de mayor ancho, y debido también a la complejidad computacional NP-Complete del problema sólo se pudieron resolver redes de hasta ocho nodos a optimalidad. Por otro lado, con la estrategia combinada se pudieron resolver problemas de 9 y 10 nodos, teniendo la posibilidad de incrementar los tamaños de estas redes si se ejecutara el modelo durante un tiempo

Cantidad de Nodos	Forma de Resolución	Costo total de la red	Métrica		Mejora respecto a SP-FF
			FRC	Tiempo [s]	
5	Óptimo	42	4,76 %	0,265	4,54 %
	SP-OA	42	4,76 %	0,031	4,54 %
	SP-FF	44	9,09 %	-	-
6	Óptimo	102	0 %	5,843	0 %
	SP-OA	104	1,92 %	5,969	-1,92 %
	SP-FF	102	0 %	-	-
7	Óptimo	140	0 %	18,063	17,14 %
	SP-OA	142	1,40 %	0,344	15,49 %
	SP-FF	164	17,14 %	-	-
8	Óptimo	288	0 %	19,907	10,56 %
	SP-OA	292	1,37 %	202,5	9,31 %
	SP-FF	322	10,56 %	-	-
9	Óptimo	-	-	-	-
	SP-OA	362	0,55 %	752,9	20,99 %
	SP-FF	438	17,81 %	-	-
10	Óptimo	-	-	-	-
	SP-OA	646*	5,88 %*	21.600*	13,46 %*
	SP-FF	733	10,78 %	-	-

**Tabla 4.2:** Resultados de la instancia tipo 1 (conexiones más largas, menor ancho espectral) para distintos tamaños de red. \*Detenido a las 6 horas de ejecución.

Cantidad de Nodos	Forma de Resolución	Costo total de la red	Métrica FRC	Tiempo [s]	Mejora respecto a SP-FF
5	Óptimo	54	3,70 %	0,375	7,40 %
	SP-OA	54	3,70 %	0,031	7,40 %
	SP-FF	58	6,89 %-	-	-
6	Óptimo	114	0 %	49,23	0 %
	SP-OA	118	3,39 %	4,219	-3,38 %
	SP-FF	114	0 %	-	-
7	Óptimo	198	1,01 %	997,5	22,22 %
	SP-OA	198	1,01 %	58,01	22,22 %
	SP-FF	242	19,01 %-	-	-
8	Óptimo	353	0,28 %	429.916	26,91 %
	SP-OA	372*	3,49* %	21.600*	20,43* %
	SP-FF	448	21,48 %	-	-

**Tabla 4.3:** Resultados de la instancia tipo 2 (conexiones más largas, mayor ancho espectral) para distintos tamaños de red. \*Detenido a las 6 horas de ejecución.

mayor. Es destacable también que en los casos de estudio el mayor FRC que se alcanzó para la instancia 1 resuelta mediante el SP-OA fue de un 5,88 %, mientras que para la instancia 2 ésta alcanzó un valor máximo de un 3,49 % versus un 17,81 % en la instancia tipo 1 y un 21,48 % en la instancia tipo 2 resueltas mediante el SP-FF. Además, se puede apreciar que en ciertas instancias tales como la instancia tipo 1 con 5 nodos y la instancia tipo 2 con 5 y 7 nodos, se tiene que si bien existió fragmentación, estamos ante un resultado óptimo al tener el mismo costo total de la red que cuando se resuelve mediante el modelo de programación entera. Por otra parte, los tiempos de resolución de esta estrategia resultan ser significativamente menores que cuando se resuelve el problema buscando el óptimo. Finalmente, las mejoras porcentuales con respecto a la heurística Shortest Path-First Fit en la instancia 1 llegan a valores del 22,22 % y a un 20,99 % en la instancia 2.

En la literatura existen variados métodos para resolver este problema, de los cuales destaca por su rendimiento el presentado por [Christodoulopoulos et al. \(2010\)](#) donde resuelven este problema para redes con topologías simples y de 6 nodos, en el caso de redes pequeñas, hasta 14 nodos, para redes más realistas. Los autores hacen una comparación entre las soluciones logradas con su estrategia, la cual utiliza heurísticas, versus un modelo de programación entera, similar a lo

presentado en este artículo, llegando a resultados más cercanos al óptimo en el caso del modelo de programación entera pero a costa de mayores tiempos de resolución, mientras que con la estrategia presentada se logran resultados que se alejan hasta en un 10 % de lo que se obtuvo mediante el modelo de programación entera, el cual a diferencia del modelo presentado aquí, no llegó al óptimo. Si bien ésta y otras estrategias logran el objetivo de asignación eficiente del espectro, se destaca que la motivación del SP-OA es resolver este problema para una red con una topología en específico, la cual es la de las redes tipo anillo. Las otras estrategias, al querer flexibilizar su uso en variados tipos de redes, pierden eficiencia, en tiempo, y eficacia, en relación a la cercanía de los resultados al óptimo, a la hora de resolver el problema que aquí se aborda. Es por esto que resulta muy importante tener modelos especializados, sobre todo en topologías que son ampliamente utilizadas en la realidad como lo es la topología aquí presentada.

## 5 | Conclusiones

En este artículo se presenta un método de resolución combinado para el problema de Ruteo y Asignación de Espectro (R&SA) para redes ópticas elásticas, estáticas, sin conversión y con topología de anillo. El rendimiento de este método se evalúa resolviendo dos tipos de instancias y comparando estos resultados con los obtenidos por la heurística Shortest Path-First Fit (SP-FF). En el caso de redes pequeñas (5 o 6 nodos) el SP-FF tiene un rendimiento similar a la estrategia propuesta, llegando incluso a la solución óptima en algunos casos. Para redes con una mayor cantidad de nodos, la estrategia propuesta tiene un rendimiento superior al SP-FF, teniendo ahorros de hasta un 22 % en el costo total de la red. Además, el tiempo de resolución disminuye significativamente en comparación a la resolución óptima de este problema, dejando de esta manera a la estrategia propuesta en el presente artículo como la más competitiva para la resolución del ruteo y asignación de espectro en redes ópticas elásticas, sin conversión de longitud de onda y con topología de anillo.

### 5.1. Investigaciones futuras

Una de las ventajas de la tecnología que se desea utilizar para la transmisión eficiente de datos mediante redes ópticas es que teóricamente tiene una escalabilidad que permitiría responder ante las crecientes demandas durante muchos años más. Para esto se tienen que resolver problemas, tanto de software como el que se presenta en esta tesis como de hardware, generar transistores elásticos que puedan realizar multiplexaciones que se ajusten a cada demanda, receptores que puedan recibir y demultiplexar demandas de cualquier tamaño, entre otros. En el presente trabajo se aborda el problema de ruteo y asignación de espectro para redes ópticas elásticas y estáticas, lo que quiere decir que se debe conocer a priori cuáles serán las demandas de ancho de banda para luego resolver el problema mediante la estrategia SPOA y así poder asignar a cada conexión una ruta y una porción de espectro específicas. Dado que en la realidad lo que se desea es trabajar On-Line, algunas de las

investigaciones que deben seguir desde esta memoria deben ser:

- 1.- Realizar trabajos de ingeniería en el modelo de programación entera para verificar si se puede lograr el mismo objetivo pero con una menor cantidad de variables y restricciones. Esto permitiría que el presente modelo sea más competitivo y que pueda resolver redes con mayor cantidad de nodos.
- 2.- Generar modelos y heurísticas que permitan la resolución del problema On-Line, en donde se busque siempre minimizar la probabilidad de bloqueo de la red.
- 3.- Lo mismo que el ítem anterior, pero para redes ópticas con conversión de longitud de onda.

# Bibliografía

Ash, Gerald R (1997). *Dynamic routing in telecommunications networks*. McGraw-Hill Professional. [2.2.4](#)

Chlamtac, Imrich; Ganz, Aura; y Karmi, Gadi (1992). Lightpath communications: An approach to high bandwidth optical wan's. *Communications, IEEE Transactions on*, 40(7), 1171–1182. [2.2.4](#)

Christodoulopoulos, Kostas; Tomkos, Ioannis; y Varvarigos, Emmanouel A (2010). Routing and spectrum allocation in ofdm-based optical networks with elastic bandwidth allocation. In *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010), 2010 IEEE* (pp. 1–6).: IEEE. [4.5](#)

Das, Utpal; Sahu, PK; y Patnaik, Bijayananda (2014). Ultra high bit-rate fiber optic hybrid (wdm and tdm) communication system design and simulation. In *Advanced Computing, Networking and Informatics-Volume 2* (pp. 159–168). Springer. [2.1.2](#)

Even, Shimon; Itai, Alon; y Shamir, Adi (1975). On the complexity of time table and multi-commodity flow problems. In *Foundations of Computer Science, 1975., 16th Annual Symposium on* (pp. 184–193).: IEEE. [2.2.2](#)

Gerstel, Ori; Jinno, Masahiko; Lord, Andrew; y Yoo, SJ Ben (2012). Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer? *Communications Magazine, IEEE*, 50(2), s12–s20. ([document](#)), [1](#), [2.3](#), [2.1](#), [2.2.4](#)

Iness, Jason y Mukherjee, Biswanath (1999). Sparse wavelength conversion in wavelength-routed wdm optical networks. *Photonic Network Communication*, 1(3), 183–205. [2.2.2](#)

Keshav, Srinivasan (1997). An engineering approach to computer networking: Atm networks, the internet, and the telephone network. *Reading MA*, 11997. [2.2.4](#)

Mokhtar, Ahmed y Azizoğlu, Murat (1998). Adaptive wavelength routing in all-optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 6(2), 197–206. [2.2.3](#), [2.2.4](#)

Monroy, I Tafur; Zibar, Darko; Gonzalez, N Guerrero; y Borkowski, Robert (2011). Cognitive heterogeneous reconfigurable optical networks (chron): enabling technologies and techniques. In *Proc. ICTON*, volume 11. [1](#), [2.2.4](#)

Ramamurthy, S (1998). Optical design of wdm network architectures. *Computer Science Department, University of California: Davis*. [2.2.3](#)

Ramaswami, Rajiv; Sivarajan, Kumar; y Sasaki, Galen (2009). *Optical networks: a practical perspective*. Morgan Kaufmann. ([document](#)), [2.1](#), [2.1](#), [2.2](#)

- Ramaswami, Rajiv y Sivarajan, Kumar N (1995). Routing and wavelength assignment in all-optical networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 3(5), 489–500. [2.2.2](#)
- Saleh, Adel AM y Simmons, Jane M (2011). Technology and architecture to enable the explosive growth of the internet. *IEEE Communications Magazine*, 49(1), 126–132. [1](#)
- Sambo, Nicola; Castoldi, Piero; Cugini, Filippo; Bottari, Giulio; y Iovanna, Paola (2012). Toward high-rate and flexible optical networks. *Communications Magazine, IEEE*, 50(5), 66–72. [1](#), [2.2.4](#)
- Sano, Akihiko; Kobayashi, Takayuki; Yamanaka, Shogo; Matsuura, Akihiko; Kawakami, Hiroto; Miyamoto, Yutaka; Ishihara, Koichi; y Masuda, Hiroji (2012). 102.3-tb/s (224 x 548-gb/s) c-and extended l-band all-raman transmission over 240 km using pdm-64qam single carrier fdm with digital pilot tone. In *National Fiber Optic Engineers Conference* (pp. PDP5C–3).: Optical Society of America. [1](#)
- Teng, Jing y Rouskas, George (2005). Traffic engineering approach to path selection in optical burst switching networks. *Journal of Optical Networking*, 4(11), 759–777. [2.2.4](#)
- Tomkos, Ioannis; Angelou, Marianna; Barroso, Ramón J Durán; de Miguel, Ignacio; Toledo, Rubén M Lorenzo; Siracusa, Domenico; Salvadori, Elio; Tymecki, Andrzej; Ye, Yabin; y Monroy, Idelfonso Tafur (2012). Next generation flexible and cognitive heterogeneous optical networks. In *The Future Internet* (pp. 225–236). Springer. [1](#), [2.2.4](#)
- Vallejos, Reinaldo y Jara, Nicolas (2014). Join routing and dimensioning heuristic for dynamic wdm optical mesh networks with wavelength conversion. *Optical Fiber Technology*, 20(3), 217–223. [2.2.4](#)
- Van Parys, Wouter; Van Caenegem, Bart; y Demeester, Piet (1998). Reduction of blocking in arbitrary meshed wdm networks through a biased routing approach. In *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 1998. OFC'98., Technical Digest* (pp.94).: IEEE. [2.2.4](#)
- Wang, Ying; Zhang, Jie; Zhao, Yongli; Liu, Junyan; y Gu, Wanyi (2012). Spectrum consecutiveness based routing and spectrum allocation in flexible bandwidth networks. *Chinese Optics Letters*, 10(s1), 10606. [2.2.4](#)
- Yin, Yawei; Zhu, Zuqing; Yoo, SJ Ben; et al. (2013). Fragmentation-aware routing, modulation and spectrum assignment algorithms in elastic optical networks. In *Optical Fiber Communication Conference* (pp. OW3A–5).: Optical Society of America. [2.2.4](#)
- Zang, Hui; Jue, Jason P; Mukherjee, Biswanath; et al. (2000). A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical wdm networks. *Optical Networks Magazine*, 1(1), 47–60. ([document](#)), [2.5](#), [2.6](#), [2.7](#)
- Zapata-Beghelli, Alejandra y Bayvel, Polina (2008). Dynamic versus static wavelength-routed optical networks. *Lightwave Technology, Journal of*, 26(20), 3403–3415. [2.2.4](#)

## A | Código AMPL (.mod)

```

# MODELO PARA DISEÑO DE RED WDM
#   FORMULACION EN AMPL
#   TOPOLOGIA EN ANILLO

# CONJUNTOS:
#

set NODOS; #Conjunto de nodos de la red
set ARCOS within (NODOS cross NODOS); #Conjunto de enlaces
set PARES_DE_NODOS within (NODOS cross NODOS); #Conjunto de conexiones

# Parámetros:

param K {PARES_DE_NODOS} default 2; #Número total de rutas entre cada par de nodos, en el caso
#número total de pistas entre cada par de nodos.
param P {ARCOS} default 34;

# si la ruta k que une i con j pasa por el arco (u,v) o no:
param d{(i,j) in PARES_DE_NODOS, k in 1..K[i,j], (u,v) in ARCOS} default 0;

#pistas necesarias para satisfacer cada demanda:
param pistas {PARES_DE_NODOS};

```

```

# Variables de decisión:
#
# var. que indica si ruta k que une los nodos i con j se usa o no:
var alpha {(i,j) in PARES_DE_NODOS, k in 1..K[i,j]} binary;

#var. que indica si se utiliza la pista p del enlace (u,v) para realizar la conexión entre (i,j)
var betha {(i,j) in PARES_DE_NODOS, (u,v) in ARCOS, p in 1..P[u,v]} binary;

#var. que indica si la pista p del enlace (u,v) es utilizada.
var gamma {(u,v) in ARCOS, p in 1..P[u,v]};

# var. que indica la cantidad de pistas utilizadas en el enlace (u,v).
var Nl {ARCOS} >=0;

# Función objetivo:
#
minimize Nro_Total_Pistas:
    sum{(u,v) in ARCOS} Nl[u,v];

# Restricciones del modelo.
#
subject to uso_unico_ruta {(i,j) in PARES_DE_NODOS}:
    sum{k in 1..K[i,j]} alpha[i,j,k] = 1;

subject to definicion_betha {(i,j) in PARES_DE_NODOS, (u,v) in ARCOS}:
    sum{p in 1..P[u,v]} betha[i,j,u,v,p] = sum{k in 1..K[i,j]} d[i,j,k,u,v]*alpha[i,j,k]*pistas[i,j]

subject to no_separacion {(i,j) in PARES_DE_NODOS, (u,v) in ARCOS, p in 1..P[u,v], r in 1..P[u,v]}:
    1-betha[i,j,u,v,p]>=betha[i,j,u,v,r];

```

```

subject to no_conversion {(i,j) in PARES_DE_NODOS, (u,v) in ARCOS, (x,y) in ARCOS, p in 1..P[u,v]}
beta[i,j,u,v,p]<=beta[i,j,x,y,p] + (1-sum{k in 1..K[i,j]} d[i,j,k,x,y]*alpha[i,j,k]);

```

```

subject to definicion_gamma {(u,v) in ARCOS, p in 1..P[u,v]}:
gamma[u,v,p]= sum{(i,j) in PARES_DE_NODOS} beta[i,j,u,v,p];

```

```

subject to uso_unico_pista {(u,v) in ARCOS, p in 1..P[u,v]}:
gamma[u,v,p]<=1;

```

```

#subject to uso_unico_pista {(u,v) in ARCOS, p in 1..P[u,v]}:
#sum{(i,j) in PARES_DE_NODOS} beta[i,j,u,v,p]<=1;

```

```

subject to definicion_Nl {(u,v) in ARCOS, p in 1..P[u,v]}:
Nl[u,v]>= p*gamma[u,v,p];

```

```

#subject to definicion_Nl {(u,v) in ARCOS, p in 1..P[u,v]}:
#Nl[u,v]>= p*sum{(i,j) in PARES_DE_NODOS} beta[i,j,u,v,p];

```