



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DE  
VALPARAÍSO



**Sebastián Mauricio Aravena Pérez**

# Estudio y Análisis de Revenue para Redes Ópticas Flexibles

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Electrónico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica  
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 4 de septiembre de 2018



# Estudio y Análisis de Revenue para Redes Ópticas Flexibles

Sebastián Mauricio Aravena Pérez

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico,  
aprobada por la comisión de la  
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la  
Facultad de Ingeniería de la  
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso  
conformada por

Sr. Ariel Leiva López

Profesor Guía

Sr. Mauricio Rodríguez Guzmán

Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann

Secretario Académico

Valparaíso, 4 de septiembre de 2018

# Agradecimientos

Agradezco principalmente a mis padres que desde un principio estuvieron para darme ánimos en los momentos difíciles y ser un pilar en que aferrarme durante el transcurso del periodo universitario. Gracias a ellos por cada día confiar y creer en mí y ser los principales promotores de mis metas.

También se agradece los consejos y guía del profesor Ariel Leiva para cómo llevar a cabo el desarrollo de este proyecto de título que siempre estuvo dispuesto a resolver mis dudas.

*Valparaíso 4 de septiembre de 2018*

*Sebastián Aravena*

# Resumen

En este proyecto de título se plantea una forma de complementar los estudios tecno- económicos de migración de las actuales redes DWDM a redes ópticas flexibles, a través de la incorporación del revenue en el análisis.

La incorporación de los revenue, sumado a los costos de capital y costos operacionales de una red, permitirá contar con mayores antecedentes para escoger la alternativa de migración más adecuada o decidir no migrar a una red con operación dinámica con asignación de espectro flexible. Para esto, se plantea una metodología general para poder obtener los revenue.

Se aplica la metodología a 3 escenarios de migración, utilizando a la red NSFnet como topología física. El primero presenta un modo de operación estática con asignación del espectro fijo con una velocidad de transmisión de 100 Gbps; el segundo, un modo de operación dinámico con asignación de espectro fijo que transmite a 100 Gbps; el último caso, un modo de operación dinámico con asignación de espectro flexible con velocidades de 2.5, 10, 40 y 100 Gbps.

El análisis de los resultados indican que en la operación dinámica y grilla flexible se obtendrán los mayores revenue para factores de reducción de la red de 0,6 a 0.8. En cambio para factores red entre 0,2 a 0,5, la operación dinámica con grilla fija tiene los mayores revenue. La operación dinámica con grilla flexible presenta la ventaja de utilizar el espectro óptico de forma más eficiente y presentar un algoritmo que asigna modulaciones robustas que permite gran alcance en establecer conexiones lo que se traduce en menos bloqueos de conexión para factores de red mayores. Es por aquello migrar a una red con asignación de espectro flexible presenta los mayores ingresos monetarios en factor de red 0,8, pese a que presenta los mayores CapEx.

Palabras claves: red óptica DWDM, migración, revenue, CapEx, factor de red.

# Abstract

This title project proposes a way to complement the studies of techno - economic migration of current DWDM networks to optical networks flexible, through the incorporation of the revenue in the analysis.

The incorporation of revenue, added to the costs of capital and operational costs of a network, will allow having more background to choose the most appropriate migration alternative or decide not to migrate to a network with dynamic operation with flexible spectrum allocation. For this, a general methodology is proposed to obtain the revenue.

The methodology is applied to 3 migration scenarios, using the NSFnet network as a physical topology. The first one presents a static mode of operation with assignment of the fixed spectrum with a transmission speed of 100 Gbps; the second, a dynamic operation mode with fixed spectrum assignment that transmits at 100 Gbps; the latter case, a dynamic operation mode with flexible spectrum allocation with speeds of 2.5, 10, 40 and 100 Gbps.

The analysis of the results indicates that the dynamic operation and flexible grid will obtain the highest revenue for reduction factors of the network from 0.6 to 0.8. In contrast for network factors between 0.2 to 0.5, the dynamic operation with fixed grid has the highest revenue. The dynamic operation with flexible grid has the advantage of using the optical spectrum more efficiently and presenting an algorithm that assigns robust modulations that allow a large scope in establishing connections, which translates into fewer connection blocks for larger network factors. That is why migrating to a network with flexible spectrum allocation presents the highest monetary income in network factor 0.8, despite having the highest CapEx

Keywords: Optical network DWDM, migration, revenue, CapEx, network factor.

# Índice general

Introducción.....	1
Objetivo general.....	2
1 Redes ópticas WDM.....	3
1.1 Introducción.....	3
1.2 Redes ópticas WDM.....	4
1.3 Red WDM bajo operación estática .....	5
1.4 Red WDM bajo operación dinámica .....	6
1.5 Redes ópticas WDM según el tipo de asignación de espectro .....	7
1.5.1 Grilla de asignación de espectro fija .....	7
1.5.2 Grilla de Asignación de espectro flexible.....	8
1.6 Problemática a resolver .....	9
1.7 Estado del Arte .....	10
1.8 Pregunta de investigación .....	11
2 Propuesta de Investigación.....	13
2.1 Antecedentes de Precio .....	13
2.2 Análisis de precios por longitud de onda.....	16
2.3 Tendencias y diferencias de precios .....	20
2.4 Revenue .....	21
3 Parámetros y Consideraciones para el simulador.....	23
3.1 Simulador de eventos discretos .....	23
3.2 Escenarios de Simulación .....	24
3.3 Algoritmo RMLSA.....	24
3.4 Topología de red .....	26
3.5 Tasas de conexión .....	26
3.6 Factor de red.....	26
3.7 Modelo de tráfico .....	27
3.8 Carga de tráfico .....	27
3.9 Tiempo promedio de conexiones.....	29
4 Resultados y análisis de simulación .....	30

---

4.1 CapEx .....	30
4.2 Resultados simulaciones .....	32
4.2.1 Factor de red de 0.4 .....	32
4.2.2 Factor de red de 0.6 .....	33
4.2.3 Factor de red de 0.8 .....	34
4.3 Análisis de resultados .....	35
4.3.1 Comparación de Revenue .....	36
4.3.2 Utilidades .....	38
Discusión y conclusiones.....	41
Bibliografía .....	44

# Introducción

En los tiempos actuales, las operadoras de redes ópticas utilizan la tecnología de transmisión WDM ( Wavelength Division Multiplexing ). Esta técnica permite la transmisión de varias señales de información independientes sobre una sola fibra óptica por medio de distintas frecuencias de portadoras ópticas o diferentes longitudes de onda, permitiendo aumentar la capacidad de transmisión de los enlaces ópticos. Los canales ópticos pueden ser transmitidos a largas distancias con tasas de transmisión (Bit-rate) de hasta 100 Gbps [1].

Las redes WDM actualmente utilizan un modo de operación estático. Este modo de operación se caracteriza por utilizar los canales ópticos de forma permanente, es decir que las conexiones entre los nodos ópticos dentro de una topología de red permanecen asignadas en escala de tiempo de días, meses o años [2-4]. La desventaja que presenta este modo de operación es que los canales ópticos son asignados, independientemente si son utilizados para transmitir información. Es por aquello que se han realizado propuestas de redes WDM que puedan establecer las conexiones de forma dinámica [5-7].

En las redes WDM con operación dinámica, las conexiones ópticas se establecen solo cuando es necesario transmitir información y al finalizar el envío de datos, la conexión se libera y los recursos destinados pueden ser utilizados en una nueva conexión entre otros pares de nodos [8-9]. Por lo mismo el modo de operación dinámico utiliza los recursos ópticos de una manera más eficiente en comparación a la operación estática.

Además, las redes ópticas WDM utilizan una grilla de asignación de espectro fija, basada en la recomendación ITU-T G.694.1 [10]. Esta establece las frecuencias centrales de los canales ópticos que operan dentro de la tercera ventana del espectro óptico (1530 nm a 1560 nm). La separación fija de los canales ópticos entre las portadoras pueden ser de 12.5, 25, 50 o 100 GHz. La separación espectral más utilizada es la de 50 GHz permitiendo utilizar solo 80 canales ópticos para la transmisión de información. Sin embargo, esta forma de asignar el espectro óptico es ineficiente ya que todas las peticiones de conexión no requieren de la misma porción de espectro [11]. Es por esto último, que investigaciones proponen utilizar una asignación flexible del espectro [12-13], en la cual el espectro es dividido y asignado según la tasas de transmisión y distancia entre los nodos, permitiendo atender más peticiones de conexión.



Hoy en día, el tráfico de datos y conexiones de redes de telecomunicaciones va en aumento y estas conexiones se caracterizan por ser heterogéneas a diferentes bit-rates [14]. A raíz de aquello, se cree que en los próximos años la capacidad de las redes WDM se verá saturada, presentando problemas para cubrir el tráfico de datos [13]. Es por esto, que los operadores de redes ópticas deberán actuar a tiempo y decidir qué alternativa de migración implementar, cómo mantener una asignación de espectro fija o migrar a una flexible, para cubrir la futura demanda. Las investigaciones proponen metodologías de evaluación tecno-económicas que permiten identificar la alternativa más económica, basadas en los costos totales (CapEx y OpEx) que los proveedores de servicios deberán invertir [15-18]. Aquellas investigaciones concluyen que la opción de mantener la operación estática con grilla fija es la más económica en términos de CapEx.

En este proyecto de título, se plantea una forma de complementar los estudios tecno- económicos de migración de las actuales redes WDM a redes ópticas flexibles, a través de la incorporación del revenue en el análisis. Este es un factor que no se ha comparado cuantitativamente y en donde se espera que los resultados obtenidos para un escenario con operación dinámica grilla flexible se vea más favorecida en comparación a otras alternativas, debido a la posibilidad de atender un mayor número de conexiones y uso eficiente del espectro óptico.

### **Objetivo general**

- Complementar los estudios tecno- económicos de migración, a través de la incorporación del revenue en el análisis para una red óptica flexible y no flexible.

### **Objetivo específico**

- Estudiar y analizar los distintos valores que se cobra por establecer conexiones en redes ópticas WDM.
- Proponer modelo para evaluar los ingresos (revenue) por el cobro por servicios en redes óptica flexible y no flexible.
- Evaluar y analizar revenue en casos particulares en redes ópticas flexibles y no flexibles bajo algoritmo RMLSA con distintas condiciones de tráfico y factor de red.

# 1 Redes ópticas WDM

## 1.1 Introducción

En las redes de comunicaciones, a medida que el tiempo transcurre, sus requerimientos han ido aumentando. Debido a esto último, se realizaron investigaciones para conseguir un medio de propagación físico que logre incrementar las capacidades de transmisión. Este medio físico es la fibra óptica.

Las fibras ópticas permiten la transmisión de grandes volúmenes con baja interferencia a largas distancias y velocidad con tasas de transmisión cercanas a los terabyte por segundo. En la actualidad estas fibras ópticas se distribuyen de forma submarina y terrestre por el mundo proporcionando conexiones transcontinentales y transoceánicas. En la Figura 1-1 se observa el despliegue de fibra óptica submarina por el mundo.

En el caso particular Chile, la conectividad internacional oceánica se obtiene de tres cables submarinos PAM-A, SAC y SAM-1, para luego dar pasó a troncales de fibra ópticas terrestres que conectan las grandes ciudades a lo largo del país.

Actualmente el tráfico de datos y conexiones de redes de telecomunicaciones va en aumento y estas conexiones se caracterizan por ser heterogéneas a diferentes bit-rates. Las operadoras de redes ópticas, debido a este aumento exponencial de tráfico, se verán en la necesidad de actuar para hacer frente a este problema. Estas deberán mejorar su infraestructura y tecnología, considerando factores importantes como son los costos de capital, costos de operaciones y los ingresos que contempla llevar a cabo dichas mejoras.

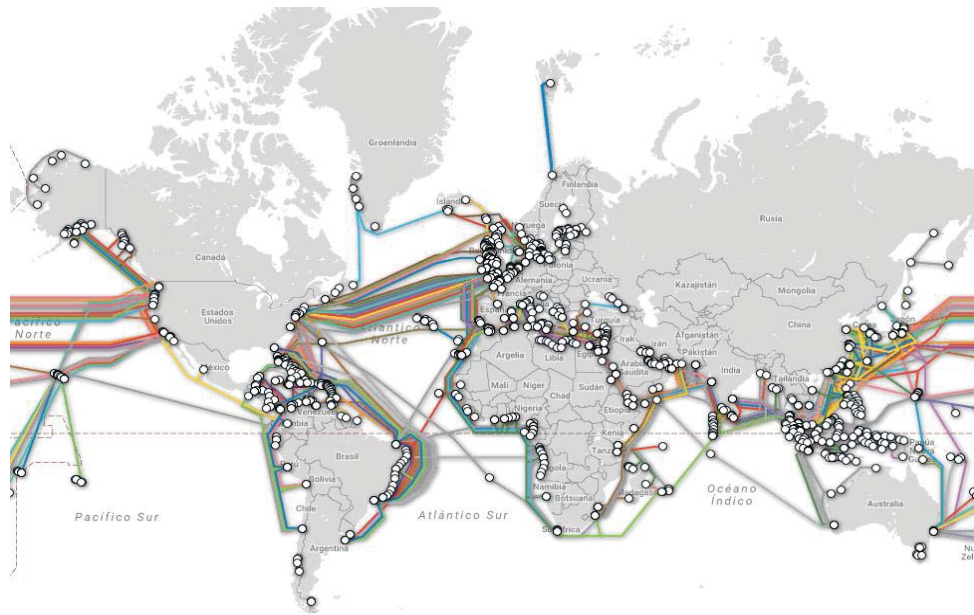


Figura 1-1 Mapa de cables submarinos actualizado al 2017 [19].

## 1.2 Redes ópticas WDM

Actualmente, las redes ópticas de transporte son las encargadas de transportar la gran cantidad de información intercambiada entre ciudades y países. En este tipo de redes se utiliza la tecnología WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), que permite una gran capacidad y velocidad de transmisión entre sus enlaces [20,21]. Esta tecnología consiste en enviar grandes volúmenes de información mediante diversas señales ópticas con distinta longitud de onda o frecuencia portadora por una misma fibra óptica sin que éstas se interfieran entre sí. Cada portadora óptica es modulada a altas velocidades de transmisión digital, actualmente de 100 Gbps y de manera experimental se han alcanzado los 102,3 Tbps [22].

En general, una red de transporte basada en WDM se compone de 2 capas: electrónica y WDM como se muestra en la Figura 1-2. La capa electrónica se compone por dispositivos electrónicos encargados de procesar las señales de información en el dominio electrónico. La comunicación de la capa electrónica con la capa WDM se realiza mediante interfaces electro-ópticas. Los dispositivos que se usan en la actualidad en la capa electrónica son SDH/SONET [23,24], OTN [25] o IP [26] y sus principales funciones son multiplexar, rutear, conmutar, controlar y gestionar las señales de información electrónica para enviarlas a la capa WDM que trabaja en el dominio óptico.

La capa WDM se conforma por dispositivos que trabajan con la tecnología WDM como son los nodos WDM y los enlaces de fibra óptica que los conectan formando una red óptica [20]. En esta capa se recibe la señal de salida de la capa electrónica para luego convertirla en una señal portadora WDM bajo la grilla definida por Rec. G.694.1 [10].

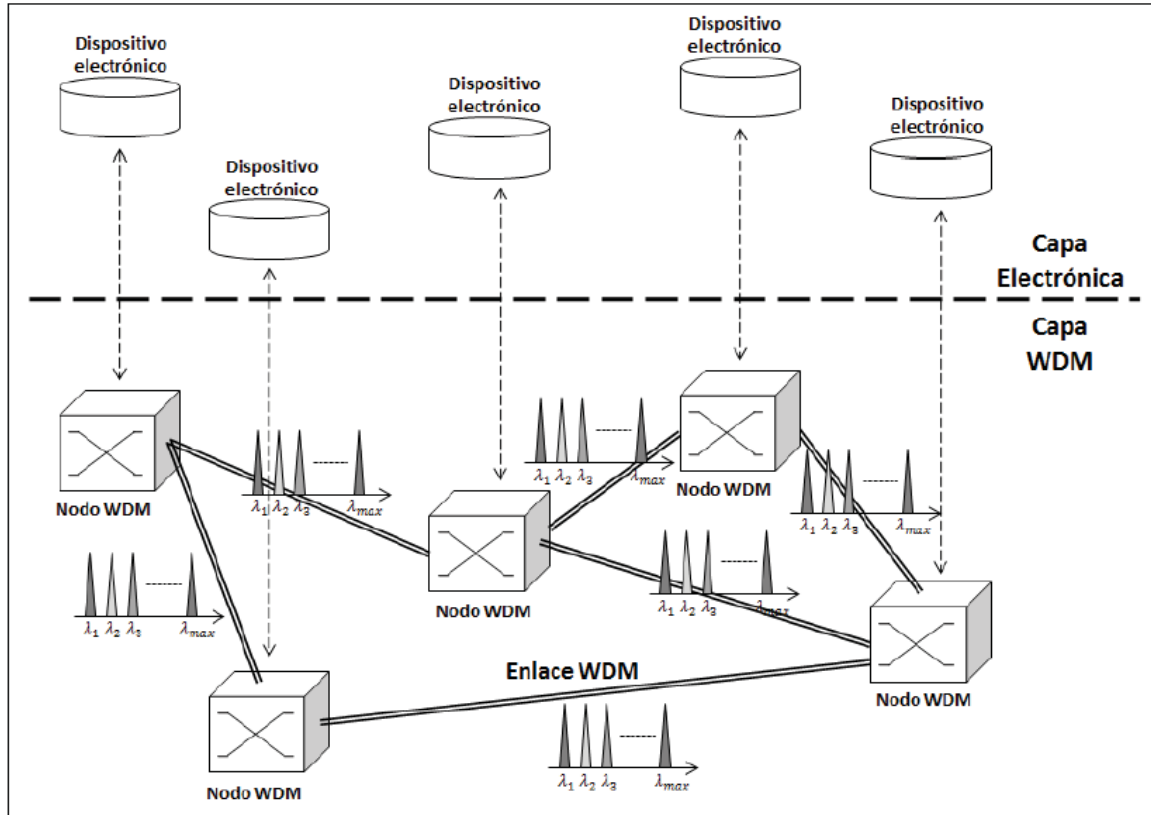


Figura 1-2 Esquema general de una red de transporte de telecomunicaciones usando tecnología WDM [27].

Para lograr transferencia de datos entre nodos de la red, se establecen caminos ópticos (*lightpaths*), los cuales sirven como ruta para las portadoras [28]. Actualmente, los caminos ópticos son de tipo estático, es decir, que permanecen establecidas desde días a años [2-4]. A este tipo de redes se le conoce como redes WDM estáticas. También existen las redes WDM que los caminos ópticos se establecen de forma dinámica, solo cuando existe una petición de demanda. Los caminos ópticos también se pueden clasificar según la grilla de asignación del espectro óptico estas pueden ser fijos y flexibles. En las secciones siguientes son explicadas en profundidad.

### 1.3 Red WDM bajo operación estática

En la actualidad, la transferencia de datos dentro de una red WDM se realiza mediante un camino óptico que es una portadora óptica que permite comunicar dos nodos de la red [28].

Se dice que una red WDM opera de forma estática cuando los caminos ópticos son establecidos casi-permanentes o estáticos. Esto quiere decir que las conexiones y recursos que se generan y utilizan en la capa WDM tales como transpondedores y longitudes de onda portadoras son asignadas de forma permanente, con una escala de tiempo de días a años [2-4].

En la Figura 1-3 se muestra un ejemplo de conexiones ópticas operando en modo estático a lo largo del tiempo. Se muestran 5 nodos donde las líneas de color rojo y azul representan dirección y transferencia de información, donde el nodo 1 y 4 transfieren al nodo 5 y 2 respectivamente. A

medida que transcurre el tiempo, las direcciones y nodos utilizados no cambian. Este modo de operación de las redes WDM presenta una desventaja, debido a que los recursos ópticos son asignados independientemente si estos son utilizados o no para transmitir información. Estudios han demostrado que la capacidad de los canales, en ciertos periodos, es utilizada en porcentajes inferiores a un 10 % de la capacidad total asignada [29], lo que se traduce en una sub-utilización de los recursos ópticos.

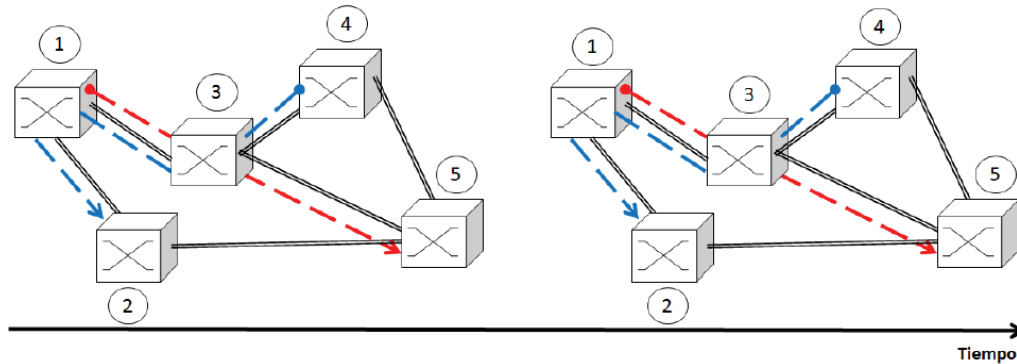


Figura 1-3 Ejemplo de conexiones ópticas en una red estática WDM a lo largo del tiempo [27].

A consecuencia de las desventajas presentadas en este modo de operación, investigaciones proponen cambiar la forma de operación a una forma dinámica [5-7].

## 1.4 Red WDM bajo operación dinámica

En una red WDM con operación dinámica, las conexiones o caminos ópticos se establecen solo cuando es necesario transmitir información y al finalizar el envío de datos, la conexión se libera y los recursos destinados pueden ser utilizados en una nueva conexión entre otros pares de nodos [8,9]. Las conexiones entre los nodos permanecerán establecidas por cortos periodos de tiempo desde milisegundos a horas [5,30]. De esta manera, se presenta una ventaja frente a las redes WDM estáticas, donde se estima una reducción de costos en equipamientos porque la operación estática para establecer nuevas conexiones los operadores de redes necesitara implementar dispositivos para tal finalidad.

En escenarios de reducido tráfico de datos [31], se puede disminuir el número de longitudes de ondas utilizadas lo que significa menor uso de regeneradores, conversores de longitud de onda en los nodos, multiplexores, demultiplexores y transmisores/receptores en los nodos [32-34]. Si bien se necesitan menos equipos, la operación dinámica requiere de nuevos dispositivos y sistemas para operar. Estos equipos son transpondedores y transmisores sintonizables, dispositivos de conmutación rápida y configuración remota, y un plano de control y gestión [35]. En este último, su función es procesar las peticiones de conexión, enviar señales de control de configuración de los dispositivos de la red WDM, también encargada de liberar los recursos cuando es finalizada la transmisión de información entre los nodos de la red.

En la Figura 1-4, se muestra un ejemplo de conexiones ópticas en una red WDM operando en modo dinámico a lo largo del tiempo. Se muestran 5 nodos con igual arquitectura de red que en

la Figura 1-3, sin embargo, con el transcurso del tiempo después que la información se transmitió de los nodos 1 y 4 a los nodos 5 y 2, respectivamente, los recursos se liberan y reasignados para transmitir la información de los nodos 1 y 2 a los nodos 4 y 5, respectivamente.

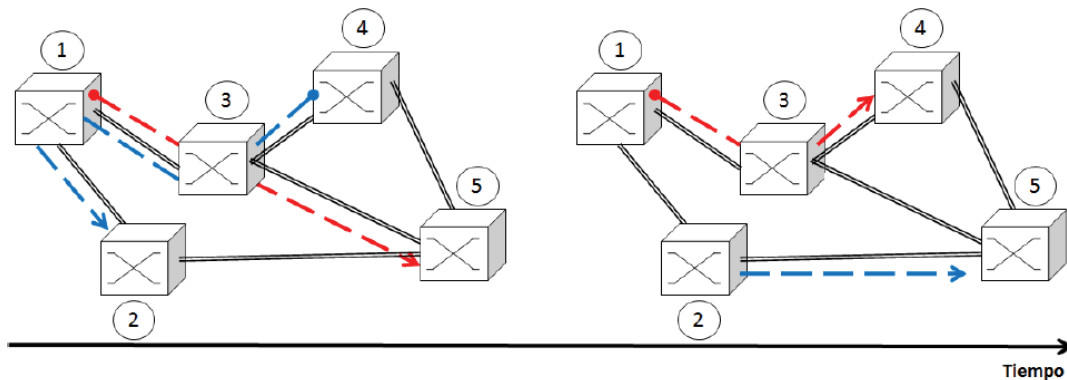


Figura 1-4 Ejemplo de conexiones ópticas en una red dinámica WDM a lo largo del tiempo [27].

## 1.5 Redes ópticas WDM según el tipo de asignación de espectro

Las redes ópticas se pueden diferenciar por la forma en que su espectro óptico es asignado para la transmisión de la información. Estas pueden ser de 2 tipos: de grilla fija y las de grilla flexible o también conocida la última como las de redes flexibles.

### 1.5.1 Grilla de asignación de espectro fija

Las redes ópticas WDM presentan la grilla de asignación de espectro fija, basada en la recomendación ITU-T G.694.1 [10]. Esta establece las frecuencias centrales de los canales ópticos que operan dentro de la tercera ventana del espectro óptico (1530 nm a 1560 nm). La separación fija de los canales ópticos entre las portadoras, pueden ser de 12.5, 25, 50 o 100 GHz. La separación del espectro óptico entre portadoras ( $\lambda$ ) establece el número de canales ópticos. La grilla de separación del espectro más común es la de 50 GHz y solo permite 80 canales ópticos debido a que el espectro óptico asignable es de 4 THz.

Una de las desventajas de utilizar la misma porción de espectro en todas las peticiones de conexión es la ineficiencia del uso del espectro óptico [11], puesto que en la actualidad las demandas son heterogéneas con conexiones a diferentes bit-rate [14]. Es decir, que las peticiones de conexión no requieren del mismo espectro. También la grilla fija no soporta tasas de transmisión de 400 Gbps y 1 Tbps en formatos de modulación estándar y separación de 50 GHz ya que se produce un traslape de los canales ópticos.

En la Figura 1-6 se muestra un espectro óptico con 4 canales ópticos y grilla fija de 50 GHz a diferentes velocidades de transmisión. En los bit-rate bajos se aprecia espectro ocioso que no es utilizado. Para solucionar estos problemas es necesario tener una mayor flexibilidad del espectro en las redes ópticas de transporte, por lo que se ha propuesto utilizar una grilla flexible.

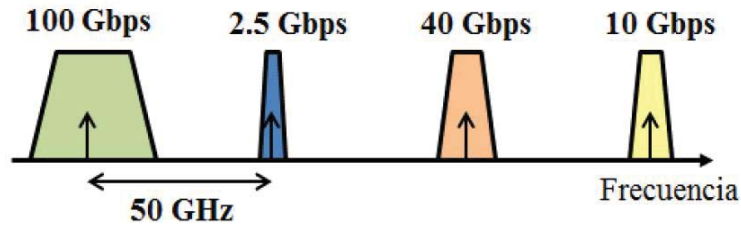


Figura 1-5 Esquema de Grilla Fija según Rec. ITU-T G.694.1 [38]

### 1.5.2 Grilla de Asignación de espectro flexible

Las redes ópticas elásticas o también redes con grilla flexible, tienen como principal función la asignación flexible del espectro según la demanda de tráfico, logrando reducir la separación de los canales ópticos sin producir traslape de las señales y por consiguiente reducir el espectro sin utilizar (ocioso). Para lograr esta división y asignación elástica del espectro, el espectro óptico es dividido en unidades discretas llamadas FSUs (Frequency Slot Unit) [36]. Los FSUs se asignan en grupos consecutivos para satisfacer las demandas de tráfico heterogéneas, frecuentemente se utilizan FSUs con un ancho espectral de 12,5 GHz. En la Figura 1-6 se ilustra la situación descrita anteriormente. La parte superior muestra un canal óptico con 4 portadoras a diferentes bit-rates, con una separación fija de 50 GHz y en la parte inferior un espectro óptico que utiliza una grilla flexible, en la cual se observa una reducción del espectro ocioso.

Debido a esta flexibilidad de asignación de espectro, se pueden atender mayor número de peticiones de conexión comparado con la asignación de grilla fija. También, las demandas con mayor uso de ancho de banda por ejemplo conexiones con alta tasas de transmisión (400 o 1000 Gbps) pueden ser atendidas.

Las redes elásticas para hacer uso de grilla flexible es necesario de nuevas técnicas de modulación como por ejemplo, OFDM (*Orthogonal frequency - division multiplexing*). Los canales ópticos con esta modulación son establecidos con múltiples subportadoras moduladas ortogonalmente y dependiendo del formato de modulación se puede definir la distancia que puede alcanzar la red óptica, para formatos robustos (mayor uso del espectro y eficiencia), se pueden transmitir señales a corta distancia [37]. Cada canal óptico tiene una separación con respecto al canal contiguo llamado banda de guarda. La Figura 1-7 muestra un canal óptico utilizando OFDM.

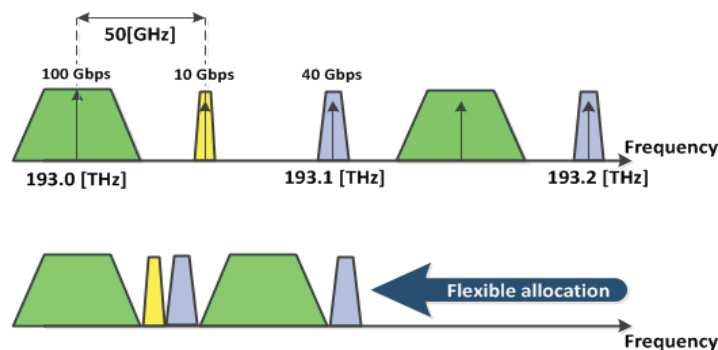


Figura 1-6 Asignación de espectro flexible [38].

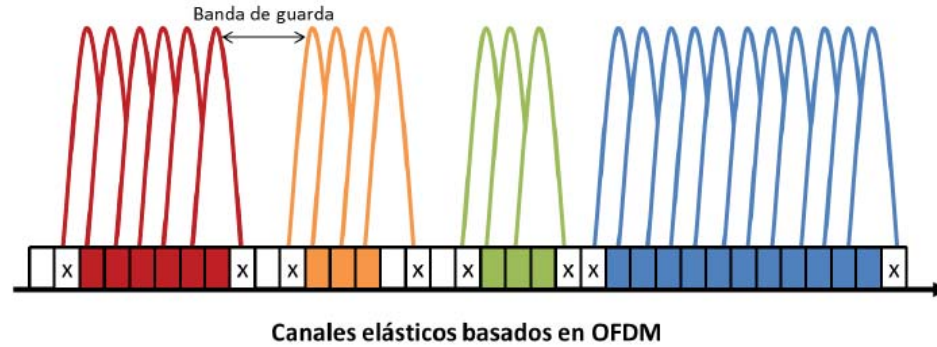


Figura 1-7 Canales en una red óptica utilizando OFDM

Las redes ópticas con grilla flexible requieren de dispositivos que también se comporten de tal manera para la recepción y transmisión de información entre los nodos de una red. Son necesarios transpondedores flexibles que operen a tasas de transmisión variables, formatos de modulación y codificación que puedan ser sintonizables en el espectro óptico. También es necesario el uso de WSS (*Wavelength Selective Switch*), que cumplen la misma función que un multiplexor y de multiplexor, conmutar de manera independiente cada una de las longitudes de onda entre un puerto común y uno de los N puertos de conmutación.

## 1.6 Problemática a resolver

Actualmente, la demanda de tráfico de las redes ópticas va en continuo aumento, asociados principalmente a los nuevos servicios y tecnologías que requieren mayor capacidad de información por segundos. Es por aquello que investigaciones han llegado a concluir que en un futuro, la capacidad de las redes comenzará a saturarse.

La Figura 1-8 muestra el crecimiento del ancho de banda entre los años 2014 y 2018. El crecimiento anual del año 2018 es cercano al 40 %. Las gráficas de barra en color verde entre el año 2017 y 2018 aumentaron en 100 Tbps aproximadamente en el uso de ancho de banda internacional.

Los operadores de red WDM, para evitar este continuo aumento de demanda de tráfico, realizan aumentos de capacidad (up-grade) cuando los niveles de utilización del espectro alcanza cierto umbral, que es determinado a criterio del operador [27].

Las redes ópticas flexibles son una posible opción para reemplazar las actuales redes ópticas WDM. Es por aquello que se han propuesto alternativas de migración y son comparadas mediante un análisis tecno-económico [15-17]. Estos análisis tecno-económicos indican que es económicamente más conveniente, para los operadores de redes ópticas, mantener una red óptica con operación estática y grilla fija o migrar a una red con operación dinámica y grilla fija o también migrar a una red con operación dinámica y grilla flexible. Pero es necesario estudiar y analizar otros métodos de evaluación de estas opciones de migración con la finalidad de permitir



contar con mayores antecedentes para escoger la alternativa de migración más adecuada o decidir no migrar a una red con asignación de espectro flexible.

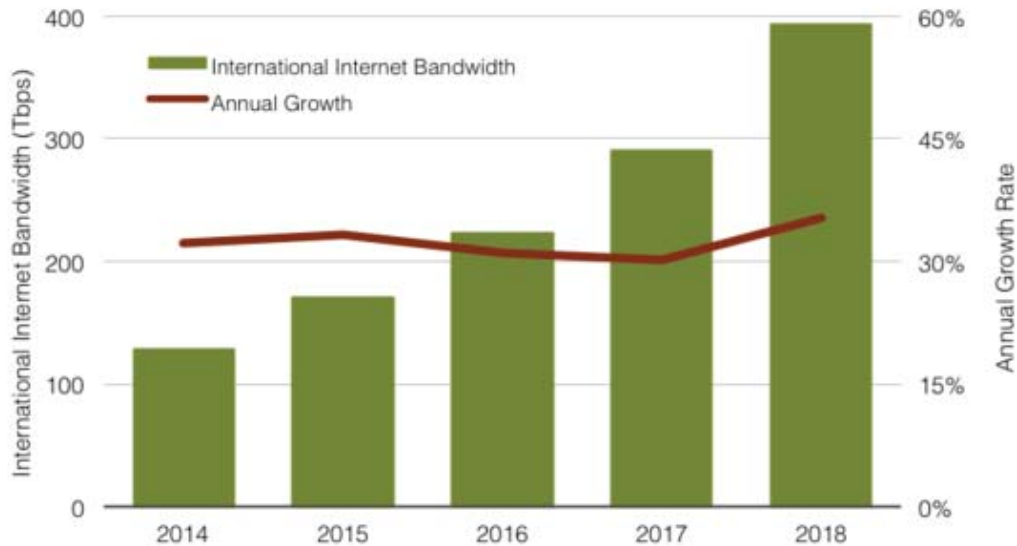


Figura 1-8 Crecimiento internacional del ancho de banda, 2014-2018 [39], Fuente: TeleGeography

## 1.7 Estado del Arte

Frente a este problema que enfrentarán las redes ópticas en los próximos años, ya se han iniciado investigaciones [12,13,15-18] con la finalidad de que los operadores de servicio de redes ópticas WDM tengan antecedente de que alternativas migración es la que mejor para satisfacer la demanda de tráfico futura. Las investigaciones proponen metodologías de evaluación tecno-económicas que permiten determinar la alternativa más económica, basadas en los costos totales que los proveedores de servicios deberán invertir.

En [15] se presenta una metodología genérica paso a paso que permite evaluar el costo total de una migración desde una red próxima a saturarse a dos alternativas o escenarios. El escenario inicial a comparar es una red WDM estática con longitudes de onda a 10 Gbps en una topología de red NSFNet. Uno de los escenarios considera mantener una operación estática y aumentar los bit-rate a 40 Gbps, el segundo escenario cambia el modo de operación a dinámico y de igual manera aumentar los bit-rate. Los escenarios son comparados en términos de CapEx y OpEx, bajo un tiempo de operación de 6 años y una carga de tráfico de 0.25 a 1. Los gastos de capital (CapEx) considera la inversión de nuevos espacios, infraestructura y dispositivos necesarios para realizar la migración y los gastos operacionales (OpEx) corresponden a los costos de funcionamiento de la red durante el periodo de operación como mantenimiento, fallas y energía. Los resultados indican que mantener una operación estática presenta menores costos de migración.

En [16] se utiliza la misma metodología de evaluación tecno-económica de la investigación [15]. El escenario inicial a comparar es una red óptica con operación estática, asignación de espectro fija de ancho espectral de 50 GHz, bit-rate a 10 Gbps y una topología de red NSFNet. Presenta 3

alternativas de migración, la 1ra alternativa una red óptica con operación estática y grilla fija (50 GHz), bit-rate de 100 Gbps. La 2da alternativa es una red óptica con operación dinámica y grilla fija (50 GHz). La 3ra alternativa una red óptica con operación dinámica, grilla flexible y bit-rate de (10, 40 y 100 Gbps). En la investigación concluyen que la migración hacia una alternativa diferente de la operación estática da como resultado un costo mayor debido principalmente a la adquisición de nuevos equipos con operación dinámica y grilla flexible.

En [17] se perfecciona la investigación [16], agregando el costo por unidad espectral que fue evaluado en los escenarios presentados en [15]. Los resultados en la eficiencia en la utilización del espectro indicaron que la alternativa con operación dinámica y grilla flexible presentaba los costos por unidad espectral más bajos, debido a que es posible atender a la misma cantidad máxima de conexiones con menor requerimiento espectral. Sin embargo al considerar únicamente costos de capital (CapEx), la opción de mantener la operación estática con grilla fija es la más económica. Cabe destacar que el costo por unidad espectral, en esta investigación, no tiene ninguna incidencia en el CapEx, solo fue determinado para identificar el potencial económico de las redes flexibles.

En [18] se hace un análisis tecno-económico de una arquitectura de red óptica reconfigurable heterogénea cognitiva (CHRON). La topología de red utilizada en este estudio fue la red troncal de telecomunicaciones polacas y la red nacional alemana de Deutsche Telekom. En ambas topologías se analizaron escenarios de migración de red ópticas con operación dinámica y asignación de espectro fija y flexible con tasas de transmisión de (10, 40, 100 Gbps) en grilla fija y hasta 400 Gbps en grilla flexible. Se presenta un modelo de costos en las cuales considera CapEx y OpEx. El estudio muestra que los beneficios relativos de las redes flexibles incrementan para cargas de tráfico mayores también que el intercambio dinámico de espectros reduce la probabilidad de bloqueo promedio de las conexiones entre los nodos, lo que podría significar mayores ingresos potenciales, debido a que puede soportar mayor tráfico, o menor CapEx, porque utiliza menos espectro óptico. Sin embargo las conclusiones obtenidas de los ingresos o revenue que podría significar implementar una red óptica flexible no son presentadas de forma cuantitativa.

Las investigaciones indican el gran potencial de las redes ópticas flexibles frente a las redes de grilla fija, lo que podría significar un mayor ingreso hacia los operadores de redes ópticas. Sin embargo, los costos de capital son más altos para las redes ópticas flexibles. Es por esto que es necesario utilizar metodologías de comparación más elaboradas entre las diferentes alternativas de migración.

En esta investigación se plantea una forma de complementar los estudios tecno-económicos de migración de las actuales redes DWDM a redes ópticas flexibles, a través de la incorporación del revenue en el análisis.

## **1.8 Pregunta de investigación**

Dado que las investigaciones presentadas anteriormente no se evalúan los posibles ingresos de forma cuantitativa de las diferentes formas de migración propuestas ante un inminente estado

de saturación de la red, este proyecto de título tiene por objetivo responder la siguiente pregunta de investigación.

**¿Bajo qué condiciones es favorable migrar de una red fija a una red flexible para los operadores de redes ópticas?**

Con la finalidad de responder esta pregunta, se utilizan los estudios tecno-económicos de evaluación de alternativas de migración de [16]. Sólo se consideran los costos de capital (CapEx) ya que representan un estimado del 90 % de los costos total de migración. Se determinan, bajo ciertos parámetros y condiciones, los revenue o ingresos por la utilización del espectro óptico de las diferentes alternativas de migración. Finalizando con un balance de utilidades que permitirá conocer que alternativa de migración es económicamente viable implementar frente a la saturación de la red óptica en un futuro.

## 2 Propuesta de Investigación

En este capítulo se presenta, una investigación y análisis de los precios que actualmente cobran los operadores internacionales de redes ópticas por utilizar el espectro óptico de la fibra óptica a diferentes tasas de transmisión. La principal fuente de información obtenida y que esta presentada en esta investigación fue proporcionada por *TeleGeography* [19], que es una firma de consultoría e investigación de mercado de telecomunicaciones, lleva a cabo investigaciones completas y compilan grandes conjunto de datos para ser presentadas en informes y bases de datos online. Esta información es de utilidad a clientes, proveedores de servicios, inversores y gobiernos.

Debido a que la información obtenida de fuentes de internet de los precios del uso del espectro óptico de las grandes operadoras de redes ópticas es escasa y la gran mayoría se adquiere mediante un pago asociado de elevado valor, se realizó una estimación con los datos recopilados mediante una ecuación de línea de tendencia de los precios de bit-rate que no están disponibles en fuentes de información.

Por último, se presenta una forma de cómo definir el precio según su bit-rate y una fórmula para poder determinar el revenue que obtendría el proveedor de redes ópticas que tiene como parámetros la distancia entre el proveedor y cliente, cantidad de conexiones establecidas y tiempo en que la conexión se mantiene en uso.

### 2.1 Antecedentes de Precio

Los precios de las diferentes rutas internacionales fueron obtenidos principalmente de [19] fuente de análisis convincentes y gráficos de las tendencias que conforman la industria de las telecomunicaciones. Parte de los datos que a continuación se presentan fueron estimados mediante líneas de tendencia ya que gran parte de la información que esta página provee son por suscripción. En la Tabla 2-1 se muestran los precios medios mensuales de portadoras moduladas por kilómetro a 2 Mbps, 45 Mbps y 155 Mbps de diferentes rutas (África-Asia, África Europa, Europa-Medio Oriente).

En la Tabla 2-2 se muestran los precios medio mensuales de portadoras moduladas por kilómetro de 10 Gbps, de las principales rutas internacionales y la Tabla 2-3 los precios de portadoras moduladas por kilómetro a 100 Gbps (Datos Actualizados al año 2015).

Los precios que se establecen a ciertos países, tienen una relación importante a la demanda de tráfico que se genera en el contienen en que se ubican, a la distancia de los enlaces ópticos y a la oferta de operadores de servicios. Es así como los precios de rutas de fibra óptica en el continente africano posea los precios más elevados del mercado, en cambio por ejemplo la ruta Los Ángeles – Tokio posee los precios más bajos.

Tabla 2-1 Precios medios mensuales portadoras moduladas a 2 Mbps, 45 Mbps y 155 Mbps de diferentes rutas (África-Asia, África Europa, Europa-Medio Oriente)

Ruta	E-1 (2 Mbps)	DS-3 (45 Mbps)	STM-1 (155 Mbps)	Dist. [km]	Precio	Precio	Precio
					mensual por km [USD/km] 2Mbps	mensual por km [USD/km] 45Mbps	mensual por km [USD/km] 155Mbps
Johannesburgo - Singapur	\$ 2.679	\$ 12.000	\$ 25.667	13500	\$ 0,1984	\$ 0,8889	\$ 1,9013
Abijan - London	\$ 1.531	\$ 7.500	\$ 15.000	9600	\$ 0,1595	\$ 0,7813	\$ 1,5625
London- Johannesburgo	\$ 1.041	\$ 5.100	\$ 9.000	14530	\$ 0,0716	\$ 0,3510	\$ 0,6194
Lagos(Nigeria) - London	\$ 1.224	\$ 6.000	\$ 14.000	9800	\$ 0,1249	\$ 0,6122	\$ 1,4286
Dubái - London	\$ 907	\$ 4.445	\$ 8.890	14800	\$ 0,0613	\$ 0,3003	\$ 0,6007
Jeddah- London	\$ 347	\$ 1.700	\$ 3.400	13000	\$ 0,0267	\$ 0,1308	\$ 0,2615
Marsellesa - Fujairah	\$ 459	\$ 2.250	\$ 4.500	11700	\$ 0,0392	\$ 0,1923	\$ 0,3846
London- Mumbai	\$ 900	\$ 4.100	\$ 9.000	14900	\$ 0,0604	\$ 0,2752	\$ 0,6040

Tabla 2-2 Precios medio mensuales de portadoras moduladas a 10 Gbps, de las principales Rutas Internacionales

Rutas	Precio mensual [USD]	Distancia [km]	Precio mensual por km [USD/km]
New york- London	\$ 6.500	6100	\$ 1,0656
Los Ángeles - Tokio	\$ 12.000	9620	\$ 1,2474
Tokio-Singapur	\$ 13.000	6800	\$ 1,9118
London- Singapur	\$ 35.000	20000	\$ 1,7500
Miami - Sao Paulo	\$ 35.000	10556	\$ 3,3156
Los Ángeles - Sídney	\$ 51.250	14428	\$ 3,5521
London- Johannesburgo	\$112.500	14530	\$ 7,7426

Tabla 2-3 Precios de portadoras moduladas a 100 Gbps de las principales Rutas Internacionales, 2015

Rutas	Precio mensual [USD]	Distancia [km]	Precio mensual por km [USD/km]
New york- London	\$ 59.000	6100	\$ 9,6721
Los Ángeles - Tokio	\$ 110.000	9620	\$ 1,2474
Tokio-Singapur	-	6800	-
London- Singapur	-	20000	-
Miami - Sao Paulo	-	10556	-
Los Ángeles - Sídney	-	14428	-
London- Johannesburgo	-	14530	-

Por ultimo las tablas 2-4 y 2-5, se muestran los precios que cobran los proveedores de servicio de forma mensual por kilómetro de todas las rutas de las que se pudo obtener información.

Tabla 2-4 Precios mensuales de diferentes rutas y Bit-rate por kilometro

Bit rates (Mbps)	Los Ángeles - Tokio	New york- London	Tokio- Singapur	London- Singapur	Miami – Sao Paulo	Los Ángeles - Sídney	London- Johannesburgo
2	-	-	-	-	-	-	\$ 0,0716
45	-	-	-	-	-	-	\$ 0,3510
155	-	-	-	-	-	-	\$ 0,6194
622	-	-	-	-	-	-	-
2500	-	-	-	-	-	-	-
10000	\$ 1,2474	\$ 1,0656	\$ 1,9118	\$ 1,7500	\$ 3,3156	\$ 3,5521	\$ 7,7426
40000	-	-	-	-	-	-	-
100000	\$11,4345	\$ 9,6721	-	-	-	-	-

Tabla 2-5 Precios mensuales de diferentes rutas y Bit-rate por kilometro

Bit-rates (Mbps)	Johannesburgo - Singapur	Abijan - London	Lagos - London	Dubai - London	Jeddah - London	Marseilles - Fujairah	London-Mumbai
2	\$ 0,1984	\$ 0,1595	\$ 0,1249	\$ 0,0613	\$ 0,0267	\$ 0,0392	\$ 0,0604
45	\$ 0,8889	\$ 0,7813	\$ 0,6122	\$ 0,3003	\$ 0,1308	\$ 0,1923	\$ 0,2752
155	\$ 1,9013	\$ 1,5625	\$ 1,4286	\$ 0,6007	\$ 0,2615	\$ 0,3846	\$ 0,6040
622	-	-	-	-	-	-	-
2500	-	-	-	-	-	-	-
10000	-	-	-	-	-	-	-
40000	-	-	-	-	-	-	-
100000	-	-	-	-	-	-	-

## 2.2 Análisis de precios por longitud de onda

Con la información de las tablas 2.4 y 2.5, se procedió a realizar gráficos para ver el comportamiento de los precios de las diferentes rutas y así determinar una posible línea de tendencia.

Las operadoras de red ópticas en su mayoría operan con tasas de transmisión de 10 Gbps, 40 Gbps y 100 Gbps. La información obtenida es limitada y no se tienen datos de diferentes bit-rates como es el caso de los 40 Gbps, mediante este análisis será posible estimarlo, para luego trabajar en futuras simulaciones de revenue.

La Figura 2-1 muestra la gráfica de dispersión de datos obtenidos de las tasas de transmisión más bajas en el mercado como son 2, 45, 155 Mbps, todos los precios son por kilómetro de uso de señal de portadoras moduladas en la fibra óptica. La Figura 2-2 muestra la gráfica de dispersión de todos los datos recolectados de las tasas de transmisión de 2 Mbps a 100 Gbps. En ambas Figuras 2-1 y 2-2 se muestra en línea roja punteada, los precios medios por kilómetro de los diferentes bit-rate. En la Tabla 2-6 se tabulan dichos precios medios.

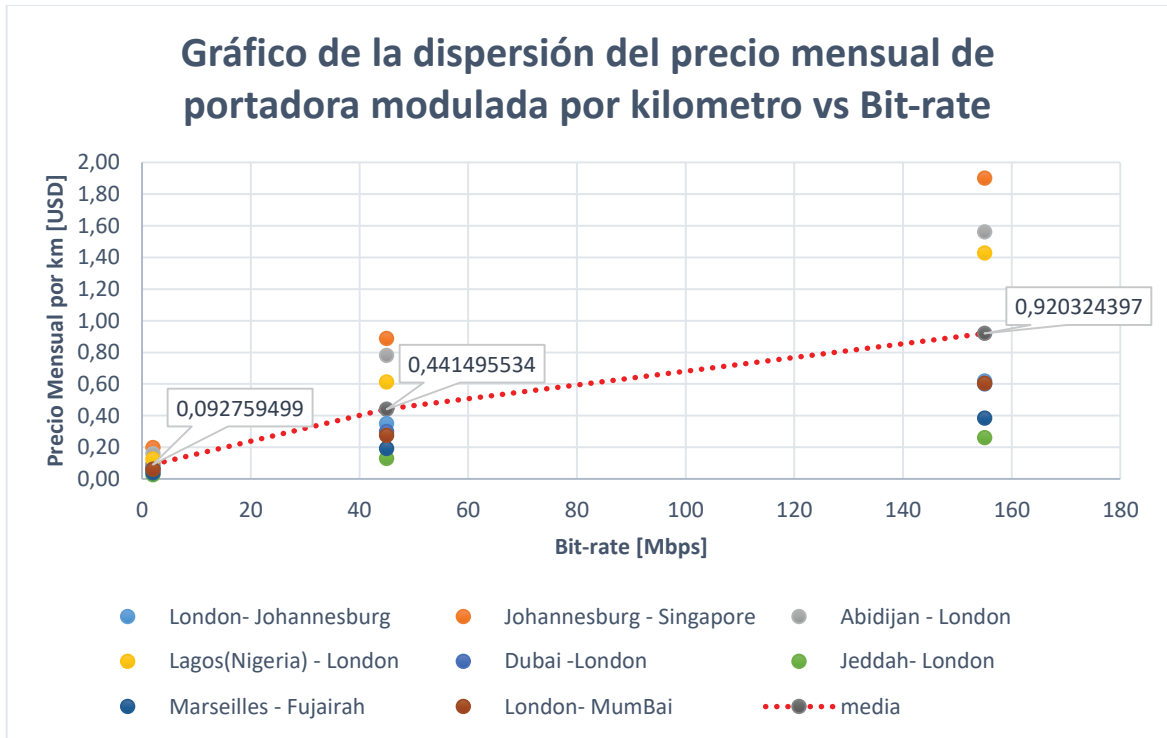


Figura 2-1 Grafico dispersión precio mensual vs Bit-rate (2, 45, 155 Mbps)

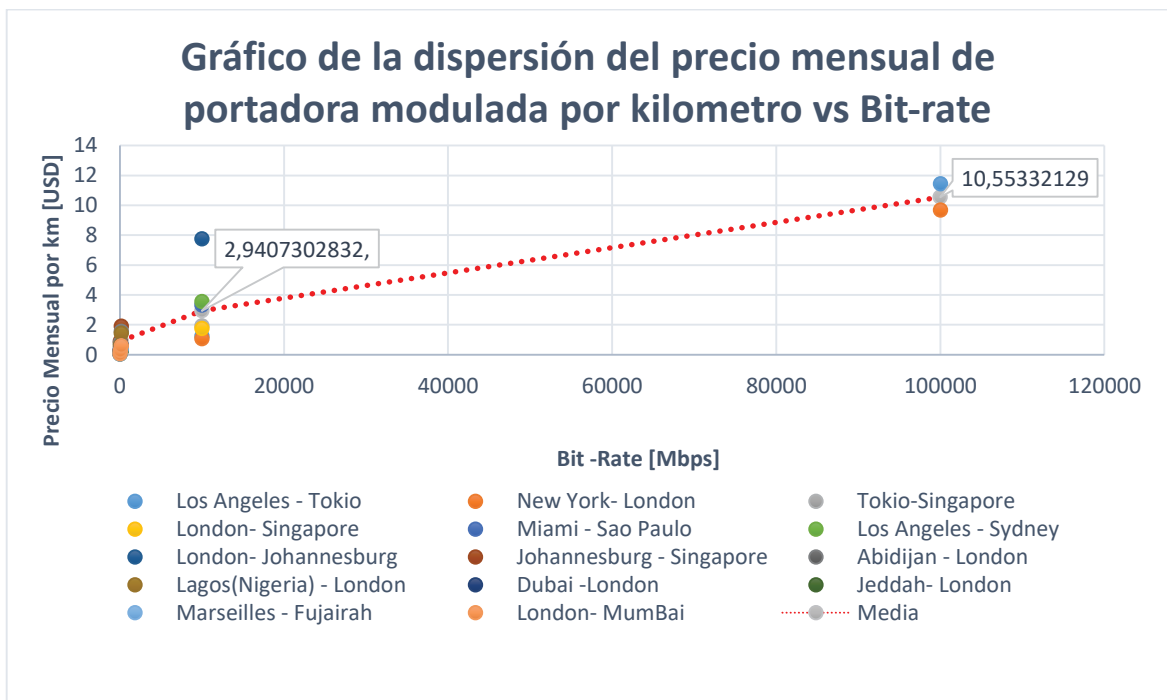


Figura 2-2 Grafico dispersión precio mensual vs Bit-rate (2, 45, 155,10000 y 100000 Mbps)



Tabla 2-6 Media de los precios mensual de portadora modulada por km.

Bit rates [Mbps]	Media precio mensual por km [USD/USD]
2	0,0928
45	0,4415
155	0,9203
10000	2,9407
100000	10,5533

Los precios por el uso del espectro óptico presentan una notoria diferencia frente un mismo bit-rate. Se determinó el porcentaje de diferencia entre el precio más bajo y alto de los respectivos bit-rate, dando como resultados un 600 %, (ver Tabla 2-7). Principalmente esta diferencia se debe a las ofertas de operadoras de fibra ópticas que participan en las diferentes rutas.

Tabla 2-7 Porcentaje de diferencia entre el precio más bajo y alto por portadora modulada a diferente Bit-rate

Bit rates	Porcentaje de diferencia
2	643,45%
45	579,74%
155	626,95%
10000	626,61%

El grafico de la Figura 2-2 al ser incluidos los precios de las tasas de transmisión más bajas (2, 45,155 Mbps). La gráfica pierde representatividad, debido a esto, se decide cambiar la escala de los ejes verticales de la gráfica, pasando de escala lineal a escala logarítmica. El resultado se muestra en la Figura 2-3.

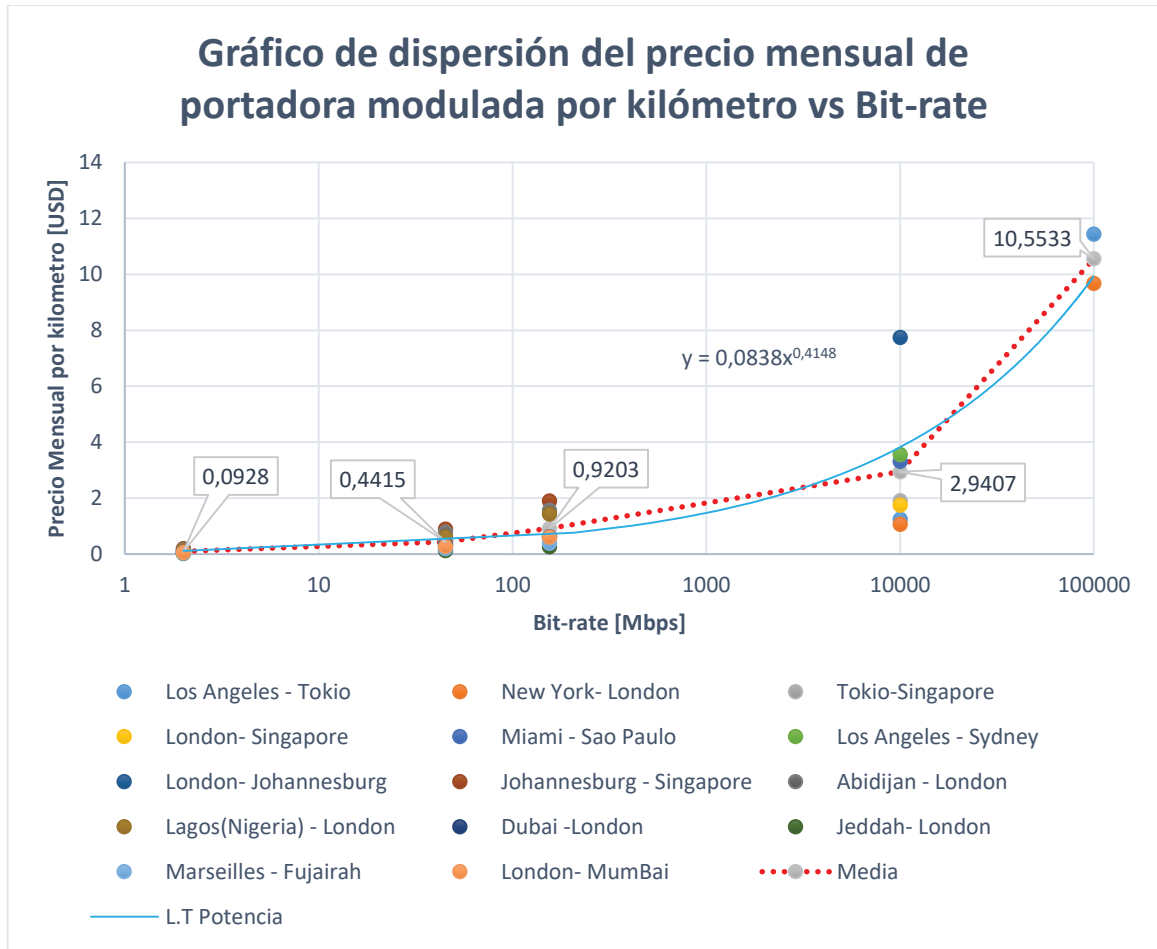


Figura 2-3 Grafico Dispersión Precio mensual vs Bit-rate, escala logarítmica

El gráfico de dispersión de la Figura 2-3 muestra un crecimiento a medida que el bit-rate aumenta. La línea de tendencia marcada de color celeste es del tipo potencial. Una línea de tendencia de potencia es una línea curva que se utiliza con conjuntos de datos que comparan medidas que aumentan a un ritmo concreto como en este caso, los precios por utilizar el espectro óptico a diferentes bit-rate. Esta línea de tendencia fue elegida frente a la línea de tendencia exponencial y polinómica de grado 2 y 3, porque presentaba un menor grado de error lo que se traduce en una curva que sigue la tendencia de los precios obtenidos. Mediante la ecuación de la línea de tendencia entregada por el software Microsoft Excel es posible estimar los precios de los bit-rate que no están disponibles. La ecuación es la siguiente:

$$y = 0,0838 * x^{0,4148} \tag{2-1}$$

Donde “x” es el bit-rate [Mbps], “y” el precio mensual de portadora modulada por kilómetro [USD/km].

A continuación, se muestra en la Tabla 2-8 la media de los precios mensuales de portadoras moduladas por km que cobran los proveedores de servicio por el uso de la fibra óptica a diferentes

Bit-rates, donde los precios de 2,5, 40 y 100 Gbps fueron estimados mediante la ecuación (2-1) de la línea de tendencia.

Tabla 2-8 Media precio mensual de portadoras moduladas por km

Bit-rates [Mbps]	Media Precio Mensual por km [USD/km]
2	0,0928
45	0,4415
155	0,9203
622	1,2081
2500	2,1513
10000	2,9407
40000	6,7948
100000	10,5533

## 2.3 Tendencias y diferencias de precios

Con los datos anteriormente expuestos, claramente se aprecian diferencias de precios para una misma tasa de transmisión. Esto se debe a las siguientes razones [39]:

- Al aumento de la competencia que existe entre los proveedores de redes ópticas logrando que al tener mayor oferta los precios se regulen a la baja, esto se puede observar en rutas que conectan al continente africano donde los precios son elevados por falta de operadores.
- Del aumento en la tasa de transmisión y mejoras en las tecnologías para redes ópticas.

Los precios, por regla general, van a la tendencia a la baja por los factores anteriormente mencionados y se puede observar gráficamente, en la Figura 2.4, el rango de precios y mediana de precios para 10 Gbps de la ruta óptica Los Ángeles – Tokio, durante el cuarto trimestre del 2012 al 2015.

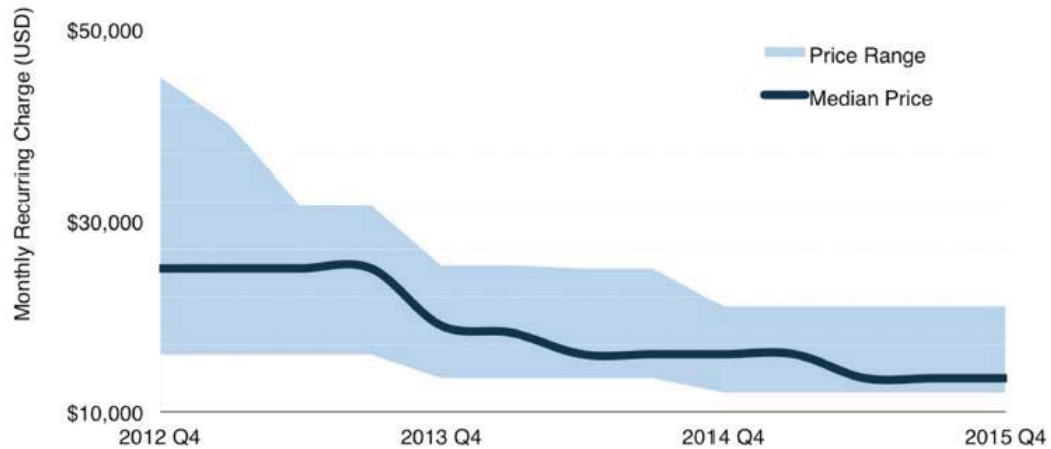


Figura 2-4 Rango y mediana de Precios para 10 Gbps desde el cuarto trimestre del 2012 al 2015, Ruta Los Ángeles – Tokio

## 2.4 Revenue

Revenue es el ingreso por la venta de algún servicio que en este caso puede ser venta por asignación de espectro del canal óptico por parte del proveedor de redes.

En el presente subcapítulo, se presenta un modelo de precio a cobrar por parte de los proveedores de redes de datos WDM, para distintas velocidades de transmisión digital y un modelo propuesto para determinar el revenue.

Las ganancias del proveedor se definen de la siguiente forma:

$$\text{Ganancias} = \text{Ingresos} - \text{Gastos (CapEx, OpEx)} \quad (2-2)$$

Donde ingresos equivale al revenue y los gastos determinados en investigaciones anteriores para diferentes escenarios (operación estática con asignación de espectro fija, operación dinámica con asignación de espectro fija y operación dinámica con asignación de espectro flexible).

La expresión utilizada para que el operador pueda determinar cuándo cobrar por la utilización de su canal óptico se basa en un valor en Dólares (USD) (ver Exp. 2-3), según la distancia en que se encuentre el operador con el cliente (km) y una unidad de tiempo por el cual permanece en uso el espectro óptico (horas, días, meses, año). A su vez el valor de ingreso del operador se registrará por el precio que se asigne a la tasa de transmisión.

$$\text{Precio}_{Gbps} = P_{Gbps} \left[ \frac{USD}{km \cdot t} \right] \quad (2-3)$$

Donde “ $P_{Gbps}$ ” corresponde al precio que cobrará el operador de redes ópticas por la utilización del espectro óptico del cliente, “USD” corresponde a la unidad monetaria dólar, “km” es la distancia en kilómetros del nodo emisor al receptor y “t” es el tiempo.

Para determinar el revenue o ingreso que obtendrá el operador de servicio se utilizó la ecuación 2-4. La ecuación en primera instancia, toma en consideración los siguientes parámetros, el precio por portadora modulada a cierta tasa de transmisión ( $P_{Gbps}$ ), la distancia del enlace entre el operador y cliente ( $D$ ) y el tiempo en que la conexión permanece establecida ( $T$ ).

$$Rev = P_{Gbps} \cdot D \cdot T \quad (2-4)$$

A modo de generalizar la ecuación 2-4, para diferentes bit-rates y cantidades de conexiones establecidas, se utilizó la ecuación 2-5.

$$Rev = \sum_{\forall j \in X} \left( \sum_{j=0}^C P_{j \text{ Gbps}} \cdot D_j \cdot T_j \right) \quad (2-5)$$

Donde, “j” corresponde al conjunto de bit-rate disponible por el operador de servicio óptico ( $X$ ), “ $P_{j \text{ Gbps}}$ ” es el precio asignado por el uso del canal óptico que transmite a cierto bit-rate ( $j$ ), “ $D_j$ ” es la distancia de fibra óptica en que se encuentra el operador de servicio con el cliente (km), “ $T_j$ ” es el tiempo que la conexión permanece establecida y “ $C$ ” es la cantidad de conexiones que se generan de cada bit-rate ( $j$ ).

Para fines de esta investigación, se consideran tasas de transmisión 2.5, 10, 40 y 100 Gbps.

## 3 Parámetros y Consideraciones para el simulador

En este capítulo, se definen los principales parámetros de los diferentes escenarios de simulación con el objetivo de obtener y comparar los revenue para distintos posibles casos de migración de una red óptica.

### 3.1 Simulador de eventos discretos

Para realizar comparaciones de los distintos modos escenarios de migración se hace necesario utilizar un simulador de eventos discretos asíncrono [40], que utiliza un lenguaje de programación C++. El simulador representa el funcionamiento de una red óptica dinámica con asignación de espectro flexible RMLSA, pero con modificaciones en las configuraciones es posible simular redes ópticas con asignación de espectro fija. En esencia, el simulador genera conexiones y desconexiones entre los distintos pares de nodos de la red a diferentes bit-rates de transmisión.

En el simulador pueden suceder los siguientes eventos:

- **Petición de conexión:** el programa genera una petición de conexión entre un nodo fuente a un nodo destino, en donde el algoritmo RMLSA le asigna los recursos necesarios en el espectro disponible y una ruta. En caso contrario, se produce un bloqueo, es decir, la conexión no puede ser establecida.
- **Evento de Conexión:** Después que se genera la petición de conexión, los recursos son asignados y se genera la conexión que permanece establecida el tiempo que se requiera.
- **Evento de desconexión:** En un evento de desconexión, se produce la liberación de todos los recursos (espectro y dispositivos), previamente utilizados, para comunicar un par de nodos en la red.

El simulador recibe como parámetros de entrada lo siguiente:

- Algoritmo RMLSA
- Topología de la red
- Tasas de conexión
- Factor de red
- Modelo de tráfico
- Carga de tráfico ( $\rho$ )
- Tiempo promedio en que las conexiones permanecen establecida

Como resultado de la simulación, el programa entregara los siguientes datos necesarios para determinar el revenue de los diferentes escenarios:

- Distancia promedio de las conexiones que se establecieron en los distintos bit-rates.
- Número de conexiones que se establecieron en los distintos bit-rates.

### 3.2 Escenarios de Simulación

Para el desarrollo de este informe se utilizaron los siguientes escenarios de migración y upgrade de las futuras redes ópticas, siguiendo las condiciones propuestas en [16].

- Escenario 1: Red óptica con operación estática y asignación de espectro fija.
- Escenario 2: Red óptica con operación dinámica y asignación de espectro fija.
- Escenario 3: Red óptica con operación dinámica y asignación de espectro flexible.

### 3.3 Algoritmo RMLSA

Para poder establecer conexiones ópticas entre pares de nodos en una red flexible es necesario establecer una ruta, el bit-rate definido en la petición de conexión y la ubicación del espectro de la señal que se desea transmitir.

Los algoritmos RMLSA en las redes ópticas flexibles resuelven el problema de asignación de los recursos de manera secuencial. Esto se refiere a que los algoritmos se llevan a cabo en 3 etapas: un algoritmo de ruteo (RA: *Routing Assignment*), un algoritmo de asignación de formato de modulación (MLA: *Modulation Level Assignment*) y un algoritmo de asignación de espectro (SA: *Spectrum Allocation*). Cada algoritmo realiza una tarea específica y también en conjunto son conocidos como *Routing Assignment, Modulation Level Assignment and Spectrum Allocation* [46].

El algoritmo de ruteo (RA) que se utiliza en la simulación es un ruteo fijo alternado que consiste en pre-calcular más de una ruta candidata para cada par de nodos en la red. En caso de que no sea posible establecer la primera ruta de la lista, se verifica la factibilidad de las rutas candidatas restantes. Para pre-calcular las rutas que contendrá la tabla de ruteo se utiliza el algoritmo de los K-caminos más cortos, que para efecto de la simulación es igual a 3 [41](quiere decir que el simulador dentro de su configuración tiene pre establecido las 3 rutas más cortas y se asigna la que esté disponible).

Una vez conocida la ruta candidata apropiada, es posible conocer su distancia en kilómetros. En función de la velocidad de transmisión requerida y largo de la ruta es posible establecer el formato de modulación apropiados para comunicar los nodos fuentes y destino.

El nivel de modulación utilizado para simular la grilla flexible, es decir, con asignación de espectro flexible es el MAS (*Minimum Allocation of Subcarriers*) [42], que consiste en el uso de OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), es decir canales ópticos que son conformados por una o más portadoras.

En el caso de la simulación de la red óptica con operación estática y dinámica con asignación de espectro fija, se utilizó una modulación prefijada. El formato de modulación es el QPSK, con una grilla con separación de 50 GHz y un alcance máximo de 2000 km.

A continuación se presenta la Tabla 3-1 las modulaciones que pueden establecerse en la simulación de grilla o asignación de espectro flexible.

Tabla 3-1 Requerimiento de espectro para cada velocidad de transmisión.

Bit-rate [Gbps]	Formato Modulación	Nº de Sub- portadoras	FSU+GB	Espectro de señales [GHz]	Espectro total [GHz]	Alcance [km]
2.5	BPSK	1	2	12,5	25	4000
10	BPSK	1	2	12,5	25	4000
40	16QAM	1	2	12,5	25	500
40	QPSK	2	3	25	37,5	2000
40	BPSK	4	5	50	62,5	4000
100	16QAM	2	3	25	37,5	500
100	8QAM	3	4	37,5	50	1000
100	QPSK	4	5	50	62,5	2000
100	BPSK	8	9	100	112,5	4000

Después de que se ha determinado el formato de modulación, es posible determinar la cantidad de espectro que se requiere para implementar el canal óptico o *Spectrum path*. El algoritmo SA (*Spectrum Allocation*) cumple con esa función, ubicar el canal óptico dentro del espectro de la banda C.

Existen distintos algoritmos para realizar la búsqueda y asignación de espectro, en este proyecto se utiliza el Algoritmo *First-Fit* (FF) [43], el algoritmo recorre el espectro del menor FSU al mayor de alguna ruta candidata y cuando encuentre disponibilidad se le asigna ese espacio. En el caso de no obtener disponibilidad y no existe otra ruta candidata, se genera un bloqueo en la conexión.



### 3.4 Topología de red

Para cada una de las simulaciones obtenidas en este informe, la topología de red a utilizar es la NSFnet, que se muestra en la Figura 3-1. Esta topología es utilizada para realizar evaluaciones de redes ópticas DWDM [43], está compuesta por 14 nodos, los cuales están conectados a través de 21 enlaces bidireccionales [4,44].

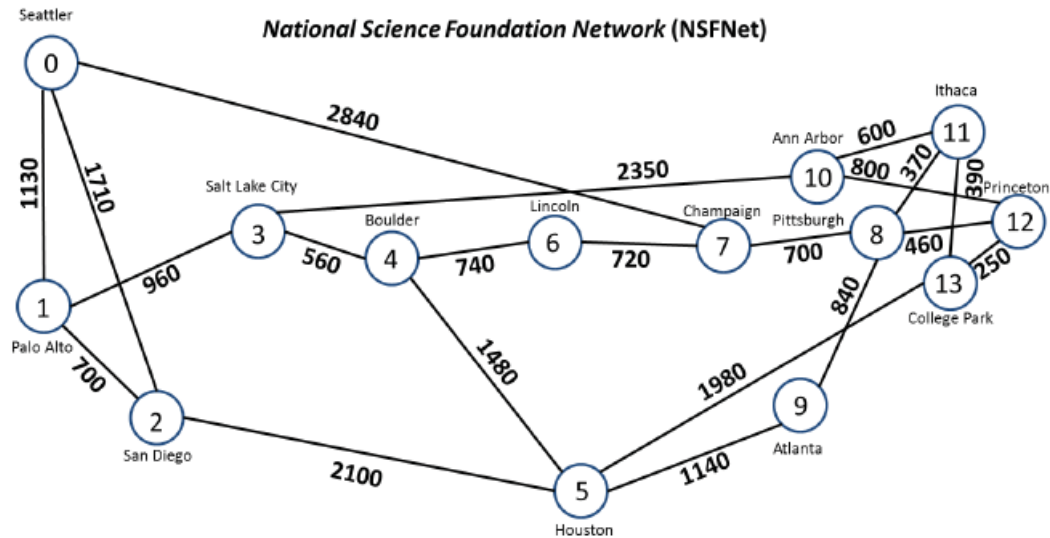


Figura 3-1 Topología de Red NSFNet, incluyendo largo de enlaces en km [27].

### 3.5 Tasas de conexión

Actualmente, las operadoras de redes ópticas utilizan conexiones con tasas de conexión entre los 2,5 Gbps y 10 Gbps, algunas pocas operadoras ya están utilizando velocidades de 40 Gbps y 100 Gbps. Es por eso que esos son los bit-rates utilizados en este informe. Para los escenarios con operación estática y dinámica con grilla fija se estableció una tasa de conexión de 100 Gbps y para el escenario con operación dinámica y grilla flexible 2,5, 10, 40, 100 Gbps. También cabe destacar que se utilizó la siguiente probabilidad de ocurrencia: 10% Conexiones de 2,5 Gbps, 20% Conexiones de 10 Gbps, 30% Conexiones de 40 Gbps y 40% Conexiones de 100 Gbps. Se establecieron tales probabilidades priorizando los bit-rate mayores debido a que cada año la demanda por tráfico de información aumenta.

### 3.6 Factor de red

Debido a que este trabajo se centra en redes transparentes, es decir, que no se cuenta con dispositivos de regeneración en los nodos, y a que algunas de las posibles rutas de la topología NSFnet rondan los 9130 km, valor que es muy superior al alcance óptico máximo establecido (para las señales utilizando el formato de modulación más robusto), es que a cada uno de los enlaces de cada topología se aplica un factor de reducción que en este informe van desde 0.2 a 0.8. Este factor permite eliminar los bloqueos por alcance y a la vez reducir el requerimiento de espectro para establecer gran parte de las conexiones.

El promedio del largo de los enlaces es de 1086 km. Al considerar las tres primeras rutas más cortas para conectar cada par de nodos, se desprende la siguiente información: la ruta más corta es de 250 km, la ruta más larga es de 9130 km y el promedio de las rutas es de alrededor de 3000 km.

### 3.7 Modelo de tráfico

El simulador establece conexiones entre los distintos pares de nodos que se deben representar mediante un modelo de tráfico, que es del tipo ON-OFF, donde existe dos periodos de tiempo ON ( $T_{on}$ ) y Off ( $T_{off}$ ), durante el tiempo ON el nodo fuente transmite hacia el nodo destino mientras que en el tiempo Off el nodo fuente no transmite información. El esquema del modelo de tráfico se muestra en la Figura 3-2.

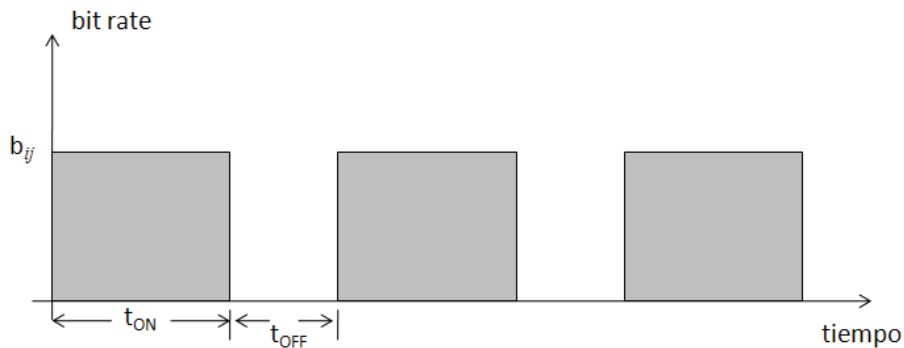


Figura 3-2 Representación del esquema del modelo de tráfico ON-OFF [27]

La carga de tráfico ofrecida para cada conexión a la red ( $\rho$ ) se define como:

$$\rho = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (3-1)$$

En la ecuación 3-1, la carga de tráfico aumenta cuando el tiempo  $T_{on}$  aumenta lo que se traduce en menor cantidad de recursos disponibles para atender nuevas peticiones de conexión y un aumento en la probabilidad de bloquear las peticiones cuando no existen suficientes recursos como para establecer, simultáneamente, todas las posibles conexiones de la red.

En el caso de una red óptica con operación estática un canal óptico es asignado de forma permanente para cada conexión. El número de canales ópticos asignados que se pueden establecer es  $N*(N-1)$ , donde  $N$  es el número de nodos existentes en la topología. En este informe se utilizan 14 nodos por lo que se traducen en 182 canales ópticos para una red con operación estática.

### 3.8 Carga de tráfico

Para cada una de las simulaciones obtenidas en este informe, se estableció un periodo de 6 años de funcionamiento de los diferentes escenarios (operación estática con grilla fija, operación dinámica con grilla fija y operación dinámica con grilla flexible) definidos en [16]. Este tiempo de

operación se determinó con la ecuación 3-2, con una tasa de crecimiento de tráfico anual de  $r=40\%$ , carga de tráfico inicial  $\rho_0=0,1$  y una carga de tráfico máxima de  $0,9$  ( $\rho_{max}$ ).

$$T = \left\lceil \frac{\log \rho_{max} - \log \rho_0}{\log \left(1 + \frac{r}{100}\right)} \right\rceil \quad (3-2)$$

Debido que las estadísticas indican que cada año hay un aumento aproximando del 40% del tráfico [45] y que la cantidad transpondedores sea la suficiente para que la probabilidad de bloqueo no supere el umbral de  $10^{-3}$  (cada 1000 conexiones generadas se permita el bloqueo de solo una conexión) [46], se utilizaron las cargas de tráfico mostradas en la tabla 3-2 en la simulación.

Tabla 3-2 Dimensionamiento de transpondedores para cargas de tráfico con aumento de 40 % anual

Periodo	t1	t2	t3	t4	t5	t6
Carga de Tráfico( $\rho$ )	0,14	0,20	0,27	0,38	0,54	0,75
Transpondedor de Tx y Tr por nodo	7	9	10	11	13	13

En la Figura 3-3 se muestra el aumento de la carga de tráfico que aumenta en función del tiempo en los 6 años de operación de los escenarios de migración.

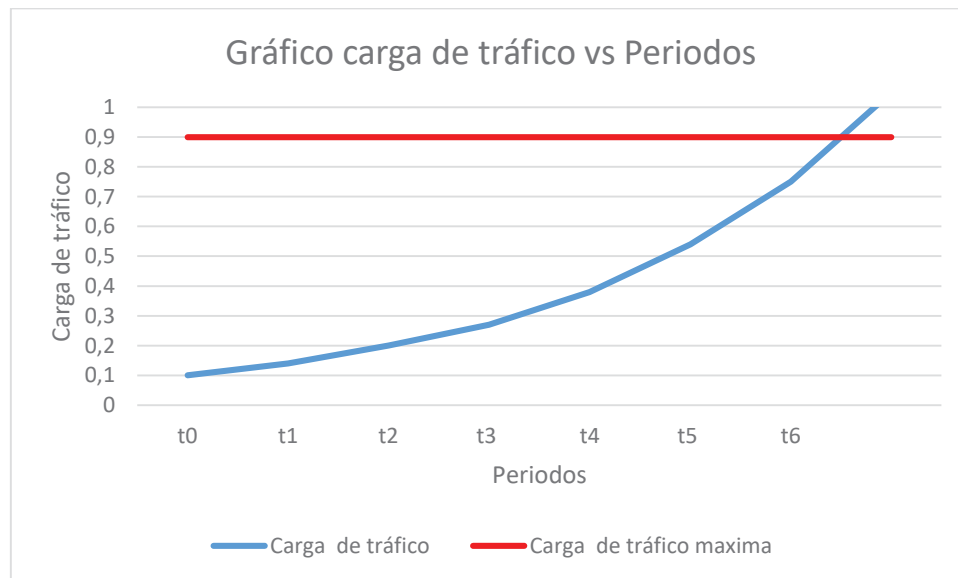


Figura 3-3 Evolución de la carga de tráfico de las conexiones en el tiempo

### **3.9 Tiempo promedio de conexiones**

En el caso de las simulaciones con redes ópticas dinámicas con grilla flexible y operación dinámica con grilla fija se estableció que el tiempo en que permanece establecida las conexiones ópticas de un  $T_{on}$  de 1 [día] por un periodo de tiempo de 1 [año], en cambio para la red óptica con operación estática y grilla fija se fijó en un  $T_{on}$  de 1 [año].

## 4 Resultados y análisis de simulación

En este capítulo, en primera instancia, se exponen los resultados obtenidos en [16], en los cuales se encuentra una investigación de los CapEx de los escenarios que se utilizaron en este informe. A continuación se presentan resultados de las simulaciones de revenue con su respectivo análisis, una vez planteados los resultados es posible realizar un balance de utilidades.

### 4.1 CapEx

Cuando las operadora de redes ópticas vean en la necesidad de mejorar su infraestructura e iniciar su proceso de migración para hacer frente a las nuevas necesidades del mercado, deberán considerar principalmente los costos de capital en dispositivos necesarios para el funcionamiento de la red, como fue investigado en [16].

En la Tabla 4-1 se muestra, la cantidad de dispositivos necesarios para el funcionamiento de los escenarios de migración. Cabe destacar que esta tabla ha sido actualizada con los precios de los dispositivos al año 2017 y la simbología [N.U] significa el Unidad Normaliza que equivale al costo de un transpondedor de 10 Gbps de 750 km de alcance, que se estableció en 7500 USD [15].

En la Figura 4-1, muestra los costos de capital en un gráfico de barras, el escenario B1 (operación estática, grilla fija) tiene un costo de 5460 [UN], el escenario B2 (operación dinámica, grilla fija) tiene un costo de 6396 [UN] y el escenario B3 (operación dinámica, grilla flexible) un costo de 6835 [UN]. El escenario con operación dinámica y grilla flexible presenta un costo de capital mayor de las tres alternativas de migración, 51 MM US\$ aproximadamente, que es un 20% mayor que la alternativa más económica, para los 6 años de operación de la red.

Tabla 4-1 Tipo, número y costo de nuevos dispositivos requeridos en los diferentes escenarios de migración

<b>Escenario</b>	<b>Descripción</b>	<b>Dispositivos</b>	<b>Costo [N.U.]</b>
Operación estática grilla fija	Transpondedor de transmisión Tx Fija 100 Gbps	$N*(N-1)=182$	15
	Transpondedor de Recepción Rx Fija 100 Gbps	$N*(N-1)=182$	15
Operación dinámica grilla fija	Transpondedor de transmisión Sintonizable a 100 Gbps	$Tx(p)$	17
	Transpondedor de recepción Sintonizable a 100 Gbps	$Rx(p)$	17
	Splitter óptico	56	0,05 * n° de puertos
	WSS no flexible	84	2.1
	Plano de Control	1	20
	Operación dinámica grilla flexible	Transpondedor de transmisión Tx flexible 100 Gbps Gbps (2.5,10, 40 and 100 Gbps)	$Tx(p)$
Operación dinámica grilla flexible	Transpondedor de Recepción Rx flexible 100 Gbps Gbps (2.5,10, 40 and 100 Gbps)	$Rx(p)$	18
	Splitter óptico	56	0,05 * n° de puertos
	WSS flexible	84	3
	Plano de Control	1	20

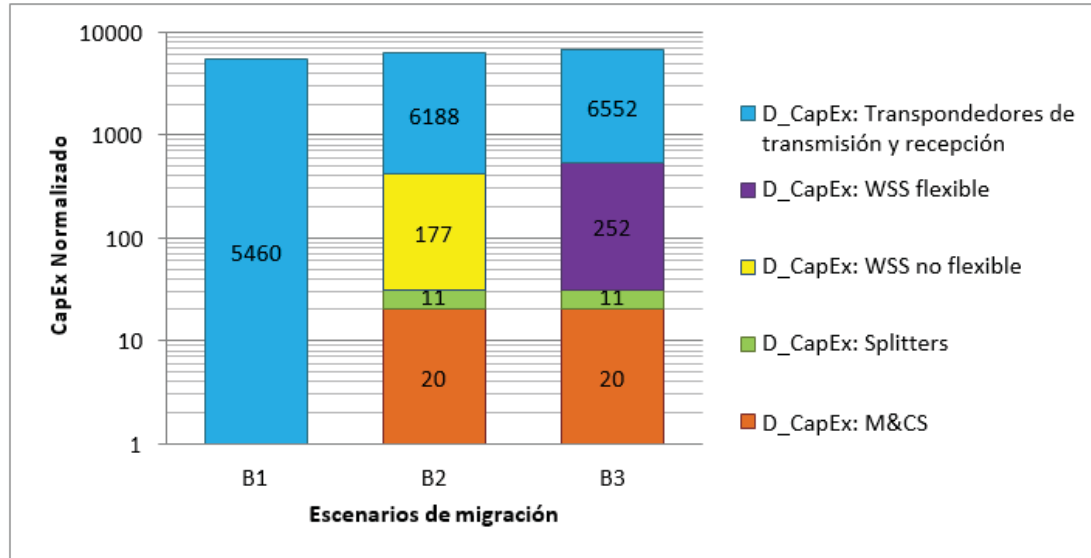


Figura 4-1 CapEx normalizado para los diferentes escenarios de migración [15]

## 4.2 Resultados simulaciones

A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante el simulador, para una red con conexiones transparente, es decir, sin nodos regeneradores. Se realizaron simulaciones con factor de reducción red de 0.2 a 0.8, rango definido de forma arbitraria asumiendo una aumento del 10% del factor de red, pero sólo se expondrán las de factor de red 0,4, 0.6 y 0.8.

### 4.2.1 Factor de red de 0.4

Tabla 4-2 Resultados de simulación, escenario operación estática con grilla fija a 100 Gbps, factor de red 0,4

Período	RHO	Mean ON (días)	Conexiones 100Gbps	Distancia Promedio (km)
t1	0,14	365	182	998
t2	0,20	365	182	1000
t3	0,27	365	182	1002
t4	0,38	365	182	1001
t5	0,54	365	182	1000
t6	0,75	365	182	999

Tabla 4-3 Resultados de simulación, escenario operación dinámica con grilla fija a 100 Gbps, factor de red 0,4

Período	RHO	Mean ON (días)	Conexiones 100 Gbps	Distancia Promedio (km)
t1	0,14	1	9427	931
t2	0,20	1	13373	932
t3	0,27	1	18026	930
t4	0,38	1	25350	929
t5	0,54	1	36064	930
t6	0,75	1	49938	932

Tabla 4-4 Resultados de simulación, escenario operación dinámica con grilla flexible a 2.5, 10, 40 y 100 Gbps, factor de red 0,4

Período	RHO	Mean ON (días)	2.5 Gbps	Dist. Prom. (km)	10 Gbps	Dist. Prom. (km)	40 Gbps	Dist. Prom. (km)	100 Gbps	Dist. Prom. (km)
t1	0,14	1	888	915	1933	941	2810	926	3796	932
t2	0,20	1	1310	956	2741	920	3947	932	5375	933
t3	0,27	1	1775	944	3694	925	5330	930	7227	928
t4	0,38	1	2563	929	5119	918	7545	937	10123	929
t5	0,54	1	3649	927	7225	944	10765	926	14426	928
t6	0,75	1	5041	929	9982	934	14972	930	20051	928

#### 4.2.2 Factor de red de 0.6

Tabla 4-5 Resultados de simulación, escenario operación estática con grilla fija a 100 Gbps, factor de red 0,6

Período	RHO	Mean ON (días)	Conexiones 100Gbps	Distancia Promedio (km)
t1	0,14	365	139	1112
t2	0,20	365	144	1076
t3	0,27	365	137	1092
t4	0,38	365	141	1075
t5	0,54	365	139	1073
t6	0,75	365	138	1061



Tabla 4-6 Resultados de simulación, escenario operación dinámica con grilla fija a 100 Gbps, factor de red 0,6

Período	RHO	Mean ON (días)	Conexiones 100 Gbps	Distancia Promedio (km)
t1	0,14	1	7095	1057
t2	0,20	1	10098	1063
t3	0,27	1	13645	1064
t4	0,38	1	19256	1067
t5	0,54	1	27274	1063
t6	0,75	1	37905	1064

Tabla 4-7 Resultados de simulación, escenario operación dinámica con grilla flexible a 2.5, 10, 40 y 100 Gbps, factor de red 0,6

Período	RHO	Mean ON (días)	2.5 Gbps	Dist. Prom. (km)	10 Gbps	Dist. Prom. (km)	40 Gbps	Dist. Prom. (km)	100 Gbps	Dist. Prom. (km)
t1	0,14	1	888	1372	1933	1411	2810	1390	3796	1399
t2	0,20	1	1310	1434	2741	1380	3947	1398	5375	1400
t3	0,27	1	1775	1416	3694	1388	5330	1395	7227	1392
t4	0,38	1	2563	1393	5119	1377	7545	1406	10123	1394
t5	0,54	1	3649	1391	7225	1416	10765	1389	14426	1392
t6	0,75	1	5041	1393	9982	1401	14972	1395	20051	1392

### 4.2.3 Factor de red de 0.8

Tabla 4-8 Resultados de simulación, escenario operación estática con grilla fija a 100 Gbps, factor de red 0,8

Período	RHO	Mean ON (días)	Conexiones 100 Gbps	Distancia Promedio (km)
t1	0,14	365	101	1164
t2	0,20	365	107	1127
t3	0,27	365	101	1147
t4	0,38	365	106	1137
t5	0,54	365	105	1148
t6	0,75	365	105	1134

Tabla 4-9 Resultados de simulación, escenario operación dinámica con grilla fija a 100 Gbps, factor de red 0,8

Período	RHO	Mean ON (días)	Conexiones 100 Gbps	Distancia Promedio (km)
t1	0,14	1	5436	1135
t2	0,20	1	7633	1129
t3	0,27	1	10361	1136
t4	0,38	1	14607	1140
t5	0,54	1	20772	1138
t6	0,75	1	28834	1139

Tabla 4-10 Resultados de simulación, escenario operación dinámica con grilla flexible a 2.5, 10, 40 y100 Gbps, factor de red 0,8

Período	RHO	Mean ON (días)	2.5 Gbps Dist. Prom. (km)	10 Gbps Dist. Prom. (km)	40 Gbps Dist. Prom. (km)	100 Gbps Dist. Prom. (km)				
t1	0,14	1	888	1828	1933	1881	2810	1853	3796	1865
t2	0,20	1	1310	1912	2741	1840	3947	1865	5375	1866
t3	0,27	1	1775	1888	3694	1850	5330	1861	7227	1856
t4	0,38	1	2563	1858	5119	1836	7545	1875	10123	1859
t5	0,54	1	3649	1855	7225	1888	10765	1852	14426	1856
t6	0,75	1	5041	1858	9982	1869	14972	1861	20051	1856

### 4.3 Análisis de resultados

Los resultados de las simulaciones del escenario operación estática con grilla fija que se muestran en las tablas 4-2, 4-5 y 4-8. Se observa que las conexiones tiene un *mean on* de 365 días, que representan que las conexiones permanecen establecidas durante 1 año. En la tabla 4-2 las conexiones de 100 Gbps son de 182 en todas las cargas de tráfico, porque el número de canales ópticos asignados que se pueden establecer es  $N*(N-1)$ , donde  $N$  es el número de nodos existentes en la topología que es de 14 nodos.

Los resultados con operación dinámica con grilla flexible presentan una mayor cantidad de conexiones establecidas frente a los otros escenarios de migración debido al tiempo que permanecen las conexiones establecidas y la variedad de bit-rate en que transmiten. El tiempo que permanecen las conexiones establecidas es de 1 día.

En los resultados de los escenarios con operación dinámica (ver tabla 4-3, 4-4, 4-6, 4-7, 4-9 y 4-10) se puede observar que al aumentar la carga de trafico Rho, la cantidad de conexiones establecidas

también incrementa. Esto se explica porque Rho representa el grado de ocupación de la red óptica. A mayor Rho el número de peticiones establecidas también lo es.

El factor de red es un término clave en este informe. Al aumentar el factor de reducción de red la cantidad de conexiones establecidas disminuye. Esto se debe a conexiones que se intentan establecer son bloqueadas por la distancia que tienen que cubrir. A partir del factor de red 0,4 en los escenarios con grilla fija, la cantidad de conexiones bloqueadas va en aumento, debido exclusivamente a bloqueos por alcance (ver tabla 4-5, 4-6, 4-7 y 4-8), pues la distancia máxima que pueden alcanzar estos escenarios es de 2000 km. Sin embargo el escenario con grilla flexible puede sobrellevar este aumento de distancias ya que el Algoritmo RMLSA asigna modulaciones robustas de gran alcance. Cabe destacar que la ruta más larga presente en la tabla de ruteo es de 9130 km, la más corta de 250 km y el promedio de las rutas es aproximadamente 3000 km.

### 4.3.1 Comparación de Revenue

Dado que las simulaciones entregan como resultado cantidad de conexiones establecidas y distancia promedio en km, se utiliza la fórmula de revenue (ver ecuación 2-5), para determinar los datos de la Tabla 4-13.

El precio de los bit-rates por km fueron definidos de forma diaria, pero los precios para las redes ópticas con operación dinámica se aumentaron un 200%, ya que se realizó un estudio del mercado chileno de la diferencia de precios entre servicios de telefonía prepago y plan, arrojando tal resultado. El servicio prepago similar a operación dinámica es 200% más costoso que un servicio de plan similar a operación estática.

La mediana del precio diario por kilómetro utilizado para operación estática se muestra en la Tabla 4-11 y para operación dinámica en la tabla 4-12.

Tabla 4-11 Mediana del Precio diario por km utilizado en escenario de operación estática

Bit-rates [Mbps]	Media Precio Diario por km [USD/km]
100000	0,3518

Tabla 4-12 Mediana del Precio diario por km utilizado en escenario de operación dinámica

Bit-rates [Mbps]	Media Precio Diario por km [USD/km]
2500	0,2151
10000	0,2941
40000	0,6795
100000	1,0553

El revenue de los distintos casos según el factor de red se muestra en la Tabla 4-13.

Tabla 4-13 Revenue para los distintos escenarios de simulación

Factor de red	Operación estática Grilla fija	Operación dinámica Grilla fija	Operación dinámica Grilla flexible
0,2	USD 65.245.043	USD 74.726.912	USD 49.938.133
0,3	USD 97.867.564	USD 112.316.475	USD 74.931.663
0,4	USD 140.211.410	USD 149.473.255	USD 99.930.015
0,5	USD 120.059.064	USD 137.751.181	USD 124.920.421
0,6	USD 116.359.599	USD 129.406.079	USD 149.911.417
0,7	USD 101.749.368	USD 116.763.054	USD 174.841.678
0,8	USD 91.675.084	USD 105.206.105	USD 199.901.002

El gráfico de estos datos es el siguiente:

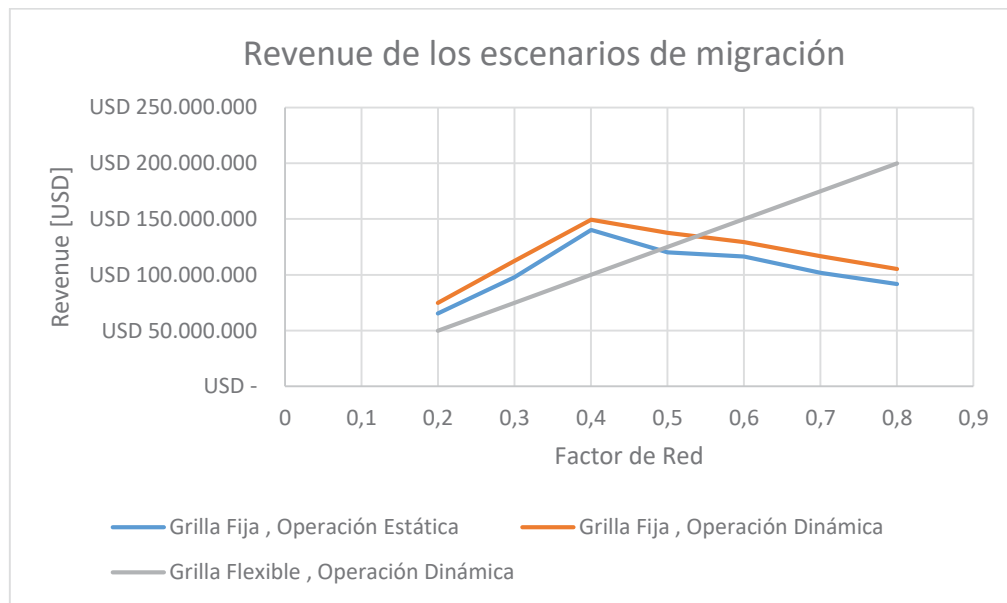


Figura 4-2 Grafica de Revenue para los distintos escenarios de simulación

En el gráfico de la Figura 4-2, se aprecia que el escenario con operación dinámica y grilla flexible presenta los mayor revenue entre los factores de red 0,2 a 0,5. En el factor 0,4 alcanza su mayor

revenue de 150 MM US\$ aproximadamente. A partir del factor 0,5, las conexiones son bloqueados por alcance.

La operación estática con grilla fija presenta el segundo revenue mas alto entre los factores de red 0,2 a 0,4. Esto se puede explicar por la forma de operación en que se establecen las conexiones, ya que las conexiones permanecen establecidas permanentemente en cambio la operación dinámica con grilla flexible, establece mayor número de conexiones porque cuando una conexión finaliza de transmisión de información, los recursos son liberados para ser asignados a otra petición de conexión.

La operación dinámica con grilla flexible presenta los revenue más bajo entre los de factor de red 0,2 a 0,4. Esto se debe principalmente a que es la única alternativa de migración en la cual se permite generar conexiones con bit-rate de 2,5, 10 y 40 Gbps. El precio por establecer estas velocidades en conexiones son considerablemente menores que una conexión de 100 Gbps, reflejando menor revenue, pese a que es la alternativa que genera la mayor cantidad de conexiones en su totalidad. Esta alternativa de migración a un factor de 0.8 se presenta el mayor revenue cercano a los 200 MM US\$, que equivale a un revenue 118% mayor que el escenario con operación estática y grilla fija. En cambio para el escenario con operación dinámica y grilla fija representa un 90% más alto.

La grafica de la figura 4-2, es posible identificar que entre los factores de red 0,5 a 0,8, el revenue de los escenarios de grilla fija disminuye proporcional al factor de red, esto se debe principalmente al uso ineficiente del espectro por lo que el programa busca establecer la conexión por las rutas más largas, bloqueándose por distancia.

### **4.3.2 Utilidades**

A continuación se presentan las posibles utilidades al implementar los escenarios de migración antes mencionados. La utilidad representan las ganancias obtenidas después de restar los costos de capital (CapEx) a los ingresos (revenues). El CapEx utilizado corresponde a la investigación obtenida en [15] que se muestra en la Figura 4-3 y los revenue de la Figura 4-4.

Los resultados se muestran en la Tabla 4-14.

Tabla 4-14 Utilidades para los distintos escenarios de simulación.

Factor de red	Grilla fija, Operación estática	Grilla fija Operación dinámica	Grilla flexible Operación dinámica
0,2	USD 24.295.043	USD 26.756.912	USD -1.324.367
0,3	USD 56.917.564	USD 64.346.475	USD 23.669.163
0,4	USD 99.261.410	USD 101.503.255	USD 48.667.515
0,5	USD 79.109.064	USD 89.781.181	USD 73.657.921
0,6	USD 75.409.599	USD 81.436.079	USD 98.648.917
0,7	USD 60.799.368	USD 68.793.054	USD 123.579.178
0,8	USD 50.725.084	USD 57.236.105	USD 148.638.502

La grafica de las utilidades se presenta en la Tabla 4-3.

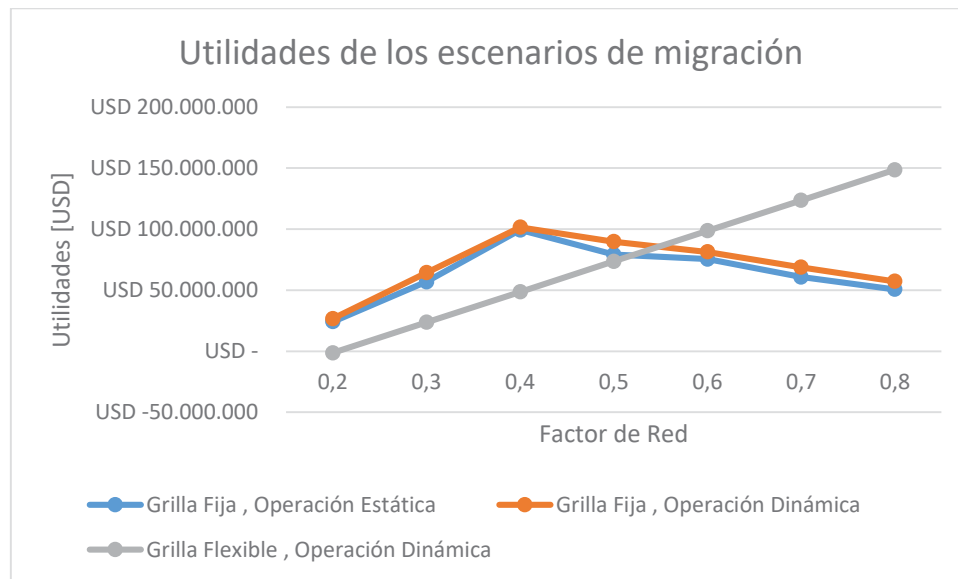


Figura 4-5 Utilidades para los distintos escenarios de simulación

La grafica de utilidades de la figura 4-3 presenta un cierto grado de similitud con la gráfica de revenue de la figura 4-2. Por lo que gran parte del comportamiento de la gráfica se debe a los factores mencionados en la comparación de la gráfica de revenue.

El escenario con operación dinámica grilla fija a un factor de 0.4, presenta las mayores utilidades con un valor cercano a los 100 MM US\$, en cambio el escenario con operación dinámica y grilla flexible entre los factores de reducción de red de 0.6 a 0.8 sus utilidades se ven favorables pese a poseer los costos de capital (CapEx) mayores frente a las otras alternativas de migración presentadas.

Cabe destacar que el escenario con operación dinámica y grilla flexible tiene el potencial de transmitir bit-rate mayores a 100 Gbps, debido a su modo flexible de asignar el espectro óptico. El simulador tiene la capacidad de establecer conexiones entre nodos de 1 Tbps para asignación de espectro flexible. Esa información es importante exponer porque no fue considerado en el desarrollo de este informe, pues se establecieron parámetros de comparación que todas las alternativas de migración lograran cumplir, en este caso los bit-rate. Pero claramente la opción flexible se vio perjudicada en las utilidades ya que el precio por establecer conexiones mayores a 100 Gbps se ve incrementado.

## Discusión y conclusiones

En este informe se estudió y analizó los revenue o ingresos por la venta de espectro óptico que los operadores de redes ópticas podrían obtener al implementar nuevas formas de utilización del espectro óptico. Todo esto, debido a que en un futuro, las redes ópticas podrían saturarse y una potencial migración a redes flexibles debería ser evaluada.

Investigaciones previas determinaron que un escenario con modo de operación estática y grilla fija frente a un aumento de capacidad presenta menores costos de capital implementarla. En cambio, los escenarios de operaciones dinámicas con grilla fija y flexible presentan mayores costos debido principalmente a la adquisición de nuevos equipos con tecnología más avanzada.

La principal ventaja que posee la grilla flexible es que los recursos son distribuidos de manera más eficiente, permite un mayor número de portadoras, reduciendo la probabilidad de bloqueo de las conexiones, a diferencia, la grilla fija presenta una asignación del espectro indiferente de la tasa de transmisión de las portadoras, acorde a la ITU-T G694.1. Debido a esta ventaja se señala que el revenue obtenido por el proveedor por la venta de espectro óptico podría ser positivo, sin embargo, no han sido evaluados numéricamente.

Para evaluar el revenue en primer lugar se realizó un estudio de los precios que se cobran en la actualidad por la utilización de espectro óptico. Este precio depende en gran medida a la cantidad de ofertantes u operadoras de cables de fibra óptica submarinos que existan en una misma ruta. Los antecedentes expuestos indican que en algunos casos existe una diferencia de 600 % en el precio por establecer conexiones con un mismo bit-rate.

En segundo lugar se propuso un modelo de revenue que incluye el precio asignado por el uso del canal óptico que transmite a cierto bit-rate, la distancia de fibra óptica en que se encuentra el operador de servicio con el cliente, el tiempo que la conexión permanece establecida y la cantidad de conexiones que se generan de cada bit-rate. Para obtener estos datos, se utilizó un simulador de eventos discretos, que representa el proceso de reserva y liberación de recursos de las conexiones en una red óptica. Para esto fue necesario establecer los parámetros a simular como son los escenarios de migración, la arquitectura de la red óptica, factores de red, Bit-rate, modelos de tráfico y factores de red.



El estudio analiza tres escenarios de migración, una red con operación estática y grilla fija, una red con operación dinámica y grilla fija y un escenario con operación de red dinámico con grilla flexible.

Se estableció a un topología de red NSFNet (compuesta por 14 nodos y 21 enlaces bidireccionales), con un modelo de tráfico del tipo ON-OFF, es decir, las conexiones establecidas tienen un periodo de actividad e inactividad, de acuerdo a una variable aleatoria exponencial con media  $T_{on}$  y  $T_{off}$ . La carga de tráfico ofrecida para cada conexión a la red ( $\rho$ ) es  $\rho = T_{on}/(T_{on} + T_{off})$ , donde  $T_{on}$  fue definido para los escenarios con operación dinámica en 1 día y para el escenario con operación estático en 365 días, el  $T_{off}$  se ajusta para obtener valores de  $\rho$  entre 0,14 a 0,75. Este tipo de modelo de tráfico, solo puede establecer una conexión entre cada par de nodo simultáneamente.

Debido a que este trabajo se centra en redes transparentes, es decir, que no se cuenta con dispositivos de regeneración en los nodos, se utiliza un factor de reducción de la red de 0,2 a 0,8.

Las tasas de transmisión utilizadas son 2,5, 10, 40 y 100 Gbps con una separación espectral de 12,5 Ghz para el escenario con grilla flexible y solo 100 Gbps con una separación espectral de 50 Ghz para los escenarios con grilla fija.

Los resultados del simulador evidenciaron que el factor de reducción es un término importante en las conclusiones obtenidas. La cantidad de conexiones establecidas depende directamente de este término para los escenarios con grilla fija. Al aumentar el factor de reducción de red la cantidad de conexiones establecidas disminuye, porque las conexiones que intenta establecer el simulador son bloqueadas por la distancia que tiene que cubrir de forma transparente. Por el contrario el escenario con grilla flexible al presentar un algoritmo RMLSA asigna modulaciones robustas que permite gran alcance en establecer conexiones.

Los resultados de los revenue indicaron que el escenario con grilla flexible y operación dinámica a un factor de 0,8 se presenta el mayor revenue cercano a los 200 MM US\$ que equivale a un 118% y 90 % mayor que los escenarios con operación fija y dinámica con grilla fija respectivamente. En cambio para factor de red 0,4, la grilla fija con operación dinámica se lleva la ventaja con revenue de 150 MM US\$.

Las utilidades que presentan en un periodo de 6 años de operación de las diferentes alternativas de migración, no difieren a las conclusiones obtenidas en los revenue. Para un factor de red de 0,4 la alternativa con operación dinámica y grilla fija, posee las mayores utilidades. Para un factor de red entre 0,6 a 0,8 la alternativa con operación dinámica y grilla flexible, posee las mayores utilidades incluso cuando sus costos de capital son más elevados debido a la adquisición de nuevos equipos con tecnología flexible.

En el factor de red 0,4, la alternativa con grilla flexible posee el revenue más bajo en comparación a las otras alternativas de migración, una de las razones que puede generar esto, es que las tasas de transferencia elegidos para operar son de baja magnitud (2,5, 10, 40 y 100 Gbps) frente a la única

tasa de transferencia de 100 Gbps de los otros escenarios. Esta única tasa de transferencia implica que se establecerán conexiones en el simulador con los precios de mercado más elevados.

La alternativa con operación dinámica y grilla flexible posee un gran potencial según las investigaciones que se han realizado y que en este trabajo se ha intentado exponer. Este potencial se reflejó bajo ciertos parámetros, principalmente el factor de reducción de la red.

Para futuras investigaciones es necesario probar otras arquitecturas de red (EON, ARPANet, etc.) lo cual implicaría establecer nuevos análisis tecno-económicos. También cambiar el modelo de tráfico por ejemplo Erlang B y C.

Esta investigación intenta establecer las conexiones de forma transparente demostrando que a rutas de extensiones más largas las probabilidades de bloqueo por alcance aumentaban, otro posible escenario de estudio podría eliminar el bloqueo por alcance de las conexiones agregando dispositivos de regeneración de señal en los nodos, lo cual involucraría un estudio de los nuevos CapEx.

Una de las ventajas de las redes ópticas con asignación de espectro flexible que no fue explotada en esta investigación, es que pueden establecer conexiones de hasta 1 Tbps, pero no fueron implementadas porque se optó por establecer equidad en las tasas de transferencia frente a las otras alternativas de migración.

# Bibliografía

- [1] J. J. Granada Torres, A. M. Cárdenas Soto y N. Guerrero González, «Redes ópticas elásticas: un nuevo paradigma en las futuras redes de telecomunicaciones,» *Respuestas*, vol. 20, nº 2, pp. 6-22, 2015.
- [2] P. Yuan y A. Xu, «The influence of physical network topologies on wavelength requirements in optical networks,» *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, nº 9, May 2010.
- [3] T. Fischer, K. Bauer y P. Merz, «Solving the routing and wavelength assignment problem with a multilevel distributed memetic algorithm,» *Memetic Computing*, vol. 1, nº 2, pp. 101-123, 2009.
- [4] S. Baroni y P. Bayvel, «Wavelength requirements in arbitrarily connected wavelength-routed optical networks,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, nº 2, pp. 242-251, Feb 1997.
- [5] D. Hunter y I. Andonovic, «Approaches to Optical Internet Packet Switching,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 38, nº 9, pp. 116-122, September 2000.
- [6] J. Turner, «Terabit burst switching,» *Journal of High Speed Networks*, vol. 8, nº 1, pp. 3-6, 1999.
- [7] M. Düser y P. Bayvel, «Analysis of a dynamically wavelength-routed optical burst switched network architecture,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, nº 4, pp. 574-785, April 2002.
- [8] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos y E. Varvarigos, «Dynamic Bandwidth Allocation in Flexible OFDM-based Networks,» de *Optical Fiber Communication Conference*, Los Angeles, California, Usa, 2011.

- 
- [9] M. Klinkowski, M. Ruiz, L. Velasco, D. Careglio, V. Lopez y J. Comellas, «Elastic Spectrum Allocation for Time-Varying Traffic in FlexGrid Optical Networks,» *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, nº 1, pp. 26-38, January 2013.
- [10] International Telecommunication Union, «Spectral Grids for WDM Applications: DWDM Frequency Grid,» *Recommendation ITU-T G.694.1*, Feb 2012.
- [11] O. Ges, O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord y S. Ben Yoo, «Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, nº 2, pp. 12-20, febrero 2012.
- [12] I. Tomkos, E. Palkopoulou y M. Angelou, «A Survey of Recent Developments on Flexible/Elastic Optical Networking,» *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pp. 1-6, 2012.
- [13] A. Mayoral, O. Gonzalez de Dios, V. López y J. Fernandez, «Migration Steps Towards,» de *Conference Proceedings of Future Network Mobile Summit*, Lisbon, Portugal, 2013.
- [14] I. Tomkos, M. Angelou, R. Durán Barroso, I. Miguel, R. Lorenzo Toledo, D. Siracusa, E. Salvadori, A. Tymecki, Y. Ve y I. Tafur Monroy, «Next Generation Flexible and Cognitive Heterogeneous Optical Networks,» de *The Future Internet*, Berlin Heidelberg, 2012.
- [15] A. Leiva, C. Mas Machuca, A. Beghelli y R. Olivares, «Migration Cost Analysis for Upgrading WDM Networks,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, nº 11, pp. 87-93, 11 November 2013.
- [16] A. Leiva, A. Beghelli, C. Mas Machuca, R. Olivares, M. Saavedra y R. Ahumada, «Generic techno-economic evaluation methodology: the case of migration to flexible grid networks,» de *Conference of Telecommunication, Media and Internet Techno-Economics (CTTE)*, Munich, Germany, 2015.
- [17] A. Leiva, I. Piña, A. Beghelli y R. Olivares, «Migración a Redes Ópticas Flexibles: Análisis Tecno-Económico de,» de *Ingelectra*, Valdivia Chile., Noviembre 2016.
- [18] E. Palkopoulou, I. Stiakogiannakis, D. Klonidis, T. Jiménez, N. Fernandez, J. Aguado, J. Lopez, Y. Ye y I. Tomkos, «Cognitive Heterogeneous Reconfigurable Optical Network: A techno-economic evaluation,» de *Future Network and Mobile Summit*, Lisboa, Portugal, 2013.
- [19] TeleGeography, «[www.telegeography.com](http://www.telegeography.com),» [En línea]. Available: <https://www.telegeography.com>. [Último acceso: Septiembre 2017].
- [20] G. P. Agrawal, «Fiber-optic communication systems,» *Wiley Series in microwave and optical engineering*, nº 4th ed, 2010.

- 
- [21] B. Chomycz, *Planning Fiber Optics Networks*, 1st ed., Mc Graw Hill, 2009.
- [22] A. Sano, T. Kobayashi, S. Yamanaka, H. Kawakami, Y. Miyamoto, K. Ishihava y M. Masuda, «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,» de *in Proc. of OFC/NFOEC, paper PDP5c*, Los Angeles, CA, USA, 2012.
- [23] H. Perros, *Connection-Oriented Networks: SONET/SDH, ATM, MPLS and Optical Networks*, 1st ed., Wiley, 2005.
- [24] J. Vasseur, M. Pickavet y P. Demeester, *Network Recovery: Protection and Restoration of Optical, SONET-SDH, IP and MPLS*, 1st edition ed., Morgan Kaufmann, 2004.
- [25] International Telecommunication Union, «Interfaces for the Optical Transport Network,» *Recommendation ITU-T G.709/Y.1331*, 2012.
- [26] A. Tanenbaum, *Computer Networks*, 5th ed., Wheterall, 2010.
- [27] A. Leiva, «Metodología de evaluación tecno-económica de procesos de migración en redes,» Tesis de Doctorado, USM, Valparaiso, 2013.
- [28] K. Manousakis, A. Angeletou y E. Varvarigos, «Energy Efficient RWA Strategies for WDM Optical Networks,» *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, nº 4, pp. 338 - 348, April 2013.
- [29] A. Odlyzko, «Data networks are lightly utilized, and will stay that way,» *Review of Network Economics*, vol. 2, nº 3, pp. 210- 237, September 2003.
- [30] Y. Wang, J. Zhang, Y. Zhao, J. Liu y W. Gu, «Spectrum consecutiveness based routing and spectrum Allocation in flexible bandwidth networks,» *Chinese Optics Letters*, vol. 10, nº s1, 2012.
- [31] A. Zapata y P. Bayvel, «Do we really need dynamic wavelength-routed optical networks ?,» *High Performance Computing and Communications, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4208, pp. 477-486, 2006.
- [32] O. Turkcu y S. Subramaniam, «Blocking in Reconfigurable Optical Networks,» *Proc. of the 26th IEEE Int'l Conf. on Comm (INFOCOM 2007)*, pp. 188-196, 2007.
- [33] O. Turkcu y S. Subramaniam, «Blocking Analysis of Limited-Reconfigurable Optical Networks,» de *16th International Conference on Computer Communications and Networks*, Honolulu, HI, USA, 2007.

- 
- [34] O. Turkcu y S. Subramaniam, «Transponder Wavelength Assignment in WDM Networks,» de *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit (OFC/NFOEC)*, San Diego, USA, 2008.
- [35] R. Martinez, C. Pinart, F. Cugini, N. Andriolli, L. Valcarenghi, P. Castoldi, L. Wosinska, J. Comellas y G. Junyent, «Challenges and requirements for introducing impairment-awareness into the management and control planes of ASON/GMPLS WDM networks,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, nº 12, pp. 76-85, December 2006.
- [36] A. Santos, C. Santos, G. Durães y D. Assis, «Roteamento e Alocação de Espectro em Redes Ópticas: O Conceito SLICE,» de *XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Brasília, DF, 2012.
- [37] H. Choi, T. Tsuritani y I. Morita, «BER-adaptive flexible-format transmitter for elastic optical networks,» *Optics Express*, vol. 20, nº 17, pp. 18652-18658, 2012.
- [38] A. Leiva, N. Pavez, A. Beghelli y R. Olivares, «A Joint RSA Algorithm for Dynamic Flexible Optical Networking,» *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, nº 11, pp. 3531 - 3537, 2015.
- [39] TeleGeography, «Executive Summary, TeleGeography Global Bandwidth Research Service,» PriMetrica, Inc., Washington, D.C, 2017.
- [40] M. Averill y W. David Kelton, *Simulation Modelling and Analysis*, 3rd ed., McGraw Hill Higher Education, 2000.
- [41] R. Ramamurthy y B. Mukherjee, «Fixed-alternate routing and wavelength conversion in wavelength-routed optical networks,» *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 10, nº 3, pp. 351-367, June 2002.
- [42] A. Leiva, R. Ahumada, A. Beghelli y R. Olivares, «Algoritmo RMLSA para Redes Ópticas Flexibles en Operación Dinámica,» de *XV Congreso Internacional de Telecomunicaciones (SENACITEL 2014)*, Valdivia, Chile, 2014.
- [43] Y. Zhao, J. Zhang, J. Wang y W. Gu, «PCE-based routing and spectrum assignment in OFDM-based bandwidth-variable optical networks,» *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, pp. 116-122, 2012.
- [44] A. Zapata y S. Ahumada, «Static vs. Dynamic Wavelength-Routed Optical Networks under Time-Varying Traffic,» de *Proc. of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit (OFC/NFOEC 2008)*, 2008.
- [45] A. Saleh y J. Simmons, «Technology and Architecture to Enable the Explosive Growth of the Internet,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, nº 1, pp. 126-132, 2011.

- [46] R. Ahumada, «Propuesta y evaluación de algoritmos RMLSA en redes ópticas elásticas transparentes bajo operación dinámica.» Tesis de magister, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, 2015.