

METODOLOGÍA PARA APLICAR CALIDAD DE SERVICIO A REDES OTN

Autor

Diego Fernando Aguirre Moreno

Tutor

Octavio Salcedo Parra

PhD En Ingeniería Informática

PhD En Estudios Políticos

Universidad Distrital Francisco José De Caldas

Maestría en Ciencias de la Información y las Comunicaciones

Énfasis en Teleinformática

Bogotá, Colombia

marzo de 2017

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN 6

PALABRAS CLAVE 6

ABSTRACT 7

KEY WORDS 7

INTRODUCCION 8

1. PROBLEMA DE INVESTIGACION 10

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 10

1.2 OBJETIVOS 13

1.3 RESULTADOS ESPERADOS 13

2. REDES OPTICAS ELASTICAS 14

2.1 GENERACIONES DE REDES ÓPTICAS DE TRANSPORTE 15

2.2 OPTICAL TRANSPORT NETWORK 16

2.3 TRAFICO DINAMICO 18

2.4 CONCEPTO DE REDES OPTICAS ELASTICAS Y FLEXGRID 19

2.5 SISTEMAS DE TRANSMISION PARA REDES OPTICAS ELASTICAS 22

2.6 MÚLTIPLEXACION POR DIVISIÓN DE FRECUENCIAS ORTOGONALES (OFDM) 24

2.6.1 ARQUITECTURA DE RED OPTICA ELASTICA BASADA EN OFDM 27

2.7 TRAFFIC GROOMING 29

3. DISEÑO 30

3.1 TOPOLOGIA (CAPA FISICA) 30

3.2 ALGORITMO HEURISTICO DRWA 36

3.2.1 ALGORITMO FIRST-FIT 38

3.2.2 EXPLICACIÓN DEL ALGORITMO EEM 39

3.3 CALIDAD DE SERVICIO OPTICO 42

3.3.1 PROBABILIDAD DE BLOQUEO 42
3.3.2 PROBABILIDAD DE PERDIDA DE PAQUETES 48
3.3.3 DELAY 49
3.3.4 RESISTENCIA DE RED 52
3.4 PLANO DE CONTROL 53
4. SIMULACION 55
4.1 TOPOLOGIAS DE RED 55
4.1 SIMULADOR 57
4.1.1 NET2PLAN 57
4.1.2 NS2 57
4.1.3 NCTUNS 59
4.2 MODELO DE ENLACE SIMULADO 59
4.2.1 NSFNET 61
4.2.2 ATLANTA NETWORK 64
4.2.3 EON 65
4.3 ENTORNOS DE SIMULACION 67
5. ANALISIS DE RESULTADOS 69
6. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS 74
TRABAJOS FUTUROS 75
APORTES DE LA INVESTIGACION 76
7. REFERENCIAS 77
ANEXOS 83
ANEXO A: CODIGO JAVA ALGORITMO EEM 83
ANEXO B: NSFNET WDM LINE ENGINEERING REPORT 90
ANEXO C: ATLANTA NETWORK WDM LINE ENGINEERING REPORT 92
ANEXO D: EON NETWORK WDM LINE ENGINEERING REPORT 96

TABLA DE FIGURAS

Figura 1 Generaciones de redes de Transporte 15
Figura 2 Asignación de canales en Flexgrid 21
Figura 3 Asignación de canales en rejilla Fija de 50 GHz 21
Figura 4 Resumen de distintas formatos de señal y ganancia 22
Figura 5 Espectro para DWDM y O-OFDM 25
Figura 6 Señal OFDM en el Dominio de tiempo y espectral a) Dominio de espectro. b) Dominio de tiempo. 26
Figura 7 Comparación entre caminos ópticos convencionales y elásticos. 27
Figura 8 Arquitectura de red óptica elástica. 28
Figura 9 Mapa Conceptual de la Metodología 31
Figura 10 Esquema de funcionamiento del rastreador de longitud de onda 32
Figura 11 Topología de malla 33
Figura 12 SLICE 34
Figura 13 Topología Ejemplo RWA 34
Figura 14 Topología de Nodo 36
Figura 15 O-OFDM canales adyacentes 37
Figura 16 a) Concepto de FSU b) Asignación de Espectro 37
Figura 17 Diagrama de Flujo del algoritmo 41
Figura 18 Clasificación Global de Métricas de Calidad de Servicio 43
Figura 19 Ejemplo Matriz M creada de una lista de demandas 45
Figura 20 NSFNET 55
Figura 21 Atlanta Network 56
Figura 22 European Optical Network (EON) 56
Figura 23 Arquitectura de NET2PLAN 58
Figura 24 Arquitectura NS2 58
Figura 25 Offline network desing 60
Figura 26 Tráfico Total Ofrecido (Gbps) vs Caminos Ópticos 70
Figura 27 Tráfico Total Ofrecido (Gbps) vs Probabilidad de Bloqueo 70
Figura 28 Delay Total por enlace en Topología EON 72
Figura 29 Delay Total por enlace en Topología NSFNET 72

Figura 30 Delay Total por enlace en Topología Atlanta Network 73

TABLA DE TABLAS

Tabla 1 Efectos Físicos 35
Tabla 2 Protocolos de un plano de control 54
Tabla 3 Información de Capa OTN 60
Tabla 4 Nodos 61
Tabla 5 Parámetros de Enlaces NSFNET 62
Tabla 6 Parámetros de entrada al Algoritmo en NSFNET 63
Tabla 7 Parámetros de Enlaces ATLANTA NETWORK 64
Tabla 8 Parámetros de Enlaces EON 65
Tabla 9 Simulaciones para las Topologías 68

TABLA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Intensidad de tráfico 18
Ecuación 2 Aproximación de BW total 19
Ecuación 3 Transformada inversa discreta de Fourier (IDFT) y Transformada discreta de Fourier (DFT) 25
Ecuación 4 Intensidad de cada demanda 45
Ecuación 5 Probabilidad de bloqueo Be 46
Ecuación 6 Probabilidad de bloqueo en la red 46
Ecuación 7 Probabilidad de Bloqueo de un camino 46
Ecuación 8 Probabilidad de no encontrar un camino en el enlace 46
Ecuación 9 Salida del correlador 48
Ecuación 10 Origen de la ortogonalidad a partir de la correlación 49
Ecuación 11 Subportadoras son ortogonales entre sí 49
Ecuación 12 Delay total 50
Ecuación 13 Promedio de retraso en almacenamiento 50
Ecuación 14 Retraso promedio proporcional a la longitud del paquete. 51
Ecuación 15 Retraso máximo 52
Ecuación 16 Disponibilidad 52

RESUMEN

Se presenta una metodología para aplicar calidad de servicio sobre redes ópticas de transporte (OTN), se realizara un análisis de conceptos básicos de las redes OTN y algunas de sus funcionalidades que permiten calidad de servicio en entorno de protección para redes IP. También se presentan simulaciones en la conmutación de paquetes fotónicos y la conmutación de longitud de onda para proporcionar Calidad de Servicio.

Se analiza la viabilidad de algoritmos heurísticos, tanto para las tareas de encaminamiento como para la asignación de longitud de onda (“λ”). Tras la evaluación de requisitos y técnicas pertinente, se presenta una propuesta algorítmica sensible tanto a la necesidad de realizar equilibrado de carga en la red, como al impacto de efectos físicos sobre la señal transmitida. Para mejorar el alcance de transmisión el algoritmo presentado permitirá el cómputo de rutas en dos tramos.

La viabilidad de los canales se determina el encaminamiento y asignación de longitudes de onda (RWA - Enrutamiento y asignación de longitud de onda), para lo cual se creó un nuevo Algoritmo basado en DRWA que es capaz de proporcionar diseños de protección con canales, reduciendo al mínimo el número de nodos compartidos por caminos disjuntos de longitud mínima. El algoritmo basado en DRWA se puso a prueba en simulación de tres topologías que reflejan la capacidad de enrutamiento.

PALABRAS CLAVE

Calidad de Servicio, enrutamiento y asignación de espectro, Enrutamiento dinámico y asignación de espectro(DRWA), IP, Multiplexación por división de onda (WDM), Multiplexación por división de onda densa (DWDM), Portadora Óptica (OC), Redes ópticas, Red Óptica de transporte (OTN), Unidad de Ranura de Frecuencia (FSU).

ABSTRACT

It presents a methodology to implement quality of service over optical transport networks OTN, an analysis of basic concepts of OTN networks and some of its features that allow service quality in environment protection for IP networks is realized. It also presents simulations in the photonic packet switching and wavelength switching to provide Quality of Service.

Viability of heuristic algorithms, both for routing tasks as for assigning wavelength ("λ") is analyzed. After evaluation of requirements and relevant techniques, it presents an algorithm proposal sensitive to both needs for load balancing in the network and the impact of physical effects on the transmitted signal. The algorithm presented allow the calculation of routes in two sections to improve transmission range

The viability of the channels is determined before the routing and wavelength assignment (RWA - Routing and wavelength assignment), for which a new algorithm based on DRWA EEM was created. It is able to provide protection designs channels, minimizing the number of shared disjoint paths of minimum length nodes. DRWA based algorithm was tested in three simulated topologies that reflect the same routing capability.

KEY WORDS

IP, Optical Networks, Quality of service (*QoS),* Optical Transport Network (OTN), Wavelength Division Multiplexing (WDM), Routing and Wavelength Assignment (RWA), Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM), Optical carrier (OC), Dynamic Routing and Wavelength Assignment (DRWA), Frecuency Slot Unit (FSU).

INTRODUCCION

La creciente demanda de tráfico por los clientes es cada vez mayor, el ancho de banda utilizado es dinámico debido a los nuevos desarrollos creados para los usuarios, tales como video conferencia, telefonía IP y la demanda de las organizaciones por obtener redes privadas (VPN´s) para el tráfico entre los datacenters. Estos hechos motivan a la preocupación de disponer una red de transporte dinámica y flexible, capaz de adaptarse a la variación en el flujo de datos y organizarlos por prioridad.

El núcleo de la redes de transporte está basado en redes ópticas, donde la principal tecnología es Multiplexación por división de onda (WDM) ofreciendo altos anchos de banda. Sin embargo WDM genera alta rigidez a la red causando bajo rendimiento del ancho de banda y poca flexibilidad al momento de reconfigurarse por la variación del tráfico.

La tecnología de redes de conmutación de paquetes ópticos se encuentra en sus primeros pasos de investigación y desarrollo comercial, no se estima viable al menos en corto plazo debido a varias complicaciones tecnológicas que aún no se han solucionado. En primer lugar la lectura de cabeceras en el dominio óptico es factible para estructuras de pocos bits, otra dificultad reside en la técnica de multiplexación de la cabecera y la carga útil. Por último la dificultad más importante reside en que no existe la posibilidad de implementar buffers ópticos controlables que no sean basados en líneas de retardo de fibra óptica (Francoy, 2007).

Elastic Optical Networks (EONs) (Union, February 2012) es un nuevo concepto para tecnologías de transporte de redes fotónicas y las tecnologías de transporte con modulación multi-portadora como Multiplexación por división de frecuencias ortogonales Óptica (O-OFDM) (al, August 2012) permiten una granularidad más fina, a la hora de crear canales con anchos de banda variables que se adapten mejor a la demanda. Las degradaciones del servicio en términos de *throughput,* retardo y *jitter* afectan en el modelo *best-effort* a todos los servicios por igual, y esto puede no ser tolerable en las redes de nueva generación que introduce complejidad a la hora del proceso de enrutado y la asignación del espectro disponible.

El desarrollo de una metodología para la aplicación de métricas de calidad de servicio sobre redes OTN va a ser el objeto de estudio de este proyecto.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La demanda de servicios de banda ancha es cada vez mayor, El ancho de banda utilizado hoy en día cambia dinámicamente y en los últimos años ha tendido a multiplicarse en promedio cada 12 meses (Roorda & Collings , 2008).

En la década anterior se lograron grandes avances en tecnologías de multiplexación por división de longitud de onda (WDM, wavelength division multiplexing). Esta técnica permite enviar portadoras con distintas longitudes de onda a través de la misma fibra, con lo que aumenta enormemente su capacidad. La Tecnología DWDM (Multiplexación por división de onda densa) ha sido una solución parcial que hace realidad las redes como las conocemos actualmente, pero no hay que dejar de lado que el ancho de banda de DWDM es constante. No se pueden agregar más canales que los que tiene configurados el sistema. Por lo tanto la solución más obvia es hacer una red reconfigurable para asignar recursos espectrales de manera dinámica.

La Red OTN (Optical Transport Network) está especificada por la Unión Internacional de Telecomunicaciones, sección Telecomunicaciones en la recomendación G.709 (ITU-T, 2001) que en ocasiones es referida como Digital Wrapper porque envuelve cualquier señal del cliente en encabezados de información para operaciones, administración y gestión. OTN nace de la evolución de Tecnologías de transporte basadas en fibra óptica (DWDM) en compañía de los protocolos y protecciones de SDH (Synchronous Digital Hierarchy) y SONET (Synchronous Optical Network) que aparecieron desde los años ochenta.

La Ley de Moore ha dictado un aumento relativamente lento en la velocidad de procesamiento electrónico, lo que significa que los datos transmitidos ópticamente tienen que ser ralentizado en cada nodo si ha de ser conmutado electrónicamente (Myungsik , Chunming, & Sudhir , 2001) .Por consiguiente, es natural encontrar maneras de construir infraestructura de información de última generación, que puede transportar paquetes IP directamente sobre la capa óptica sin ninguna O/E/O (conversión opto-electro-óptico).

Recientemente, los sistemas micro-electro-mecánicos (MEMS) y otras tecnologías de conmutación óptica han recibido mucha atención debido a su capacidad para eliminar las conversiones O/E/O. Deben ser diseñados interruptores ópticos para que mediante protocolos novedoso se logre construir una red donde los datos se mantienen en el dominio óptico en todos los nodos. Una de las cuestiones desafiante es la forma de apoyar el aprovisionamiento rápido de recursos, la transmisión asíncrona (de paquetes de tamaño variable, por ejemplo, paquetes IP), y un alto grado de intercambio de recursos estadística para el manejo eficiente de tráfico a ráfagas, todo sin necesidad de tampones en la capa WDM ya que no hay forma óptica de la memoria de acceso aleatorio (RAM) disponible en la actualidad. Por lo tanto, cualquier método de transporte totalmente ópticas deben evitar el almacenamiento tanto como sea posible.

Los primeros pasos para aplicar calidad de servicio sobre redes ópticas se están dando con las redes GMPLS, enrutamiento para soportar los requisitos de QoS podría ser también aplicado a redes ópticas (Golmie, Ndousse, & Su, 2000). El encaminamiento con QoS selecciona una ruta en línea para cada flujo o conexión para satisfacer diversos requisitos de rendimiento y optimizar al uso de recursos. El protocolo de señalización más usado es el RSVP-TE, primero fue diseñado para la red IP para luego ser modificado y ampliado por GMPLS (BERGER L. , 2003). Hay dos protocolos de reserva importantes en RSVP-TE, que son FRP y BRP (BERGER L. , 2003), todos estos protocolos y funciones que mejoran la QoS de la red MPLS-TE constituye una potente solución para la mejora de la gestión de recursos de red, especialmente en el núcleo óptico, donde hacen posibles caminos ópticos que se configuran entre routers y mejora la disponibilidad total de la red (Klinkowski & Marciniak, 2001).

En las redes de telecomunicaciones, cuando surge una demanda de tráfico, independiente del protocolo de transporte, el mecanismo de enrutamiento o los algoritmos utilizados, siempre hay un par predeterminado de dos puntos discretos que necesitan comunicarse con el fin de satisfacer la demanda de tráfico (Palmieri, 2005). Con la llegada de nuevos protocolos de ingeniería de tráfico, se ha producido gran actividad en grupos de varios estándares para integrar las tecnologías MPLS y redes WDM en una estructura para Internet óptica (Banerjee, Drakes, & Lang, B. Turner, K. K, 2001). Esta versión extendida de MPLS que se llama GMPLS que permitirá a muchos portadores desplegar Internet óptico

para la transmisión de paquetes entre routers de alto rendimiento. En este nuevo mundo de Internet, conmutadores ópticos traducen asignaciones de etiqueta en las asignaciones de longitud de onda correspondientes (SuKyoung , Griffith, & Song, 2002).

Las aplicaciones de última generación como HDTV (High Definition Television), Redes Sociales, Videos en Línea, Audios Multicanal, Transferencia de Archivos, Videojuegos, etc., requieren un gran ancho de banda que está propiciando que la transferencia de archivos vaya tendiendo poco a poco a ser simétrica, es decir, que los usuarios tengan la misma velocidad de transferencia para subir como para bajar archivos. Las empresas de telecomunicaciones encargadas de transportar los datos del Protocolo de Internet (IP) sufrirán impacto en su infraestructura para soportar las velocidades de transmisión y evitar saturar la red generando un caos en internet.

En la próxima era de la informática uno de los principales retos es ofrecer un servicio de calidad solucionando las necesidades del usuario individual. A fin de proporcionar calidad de servicio aceptable, la red debe proporcionar diferentes niveles de servicio a diferentes categorías de clientes. La garantía de calidad de servicio en las redes ópticas y su predicción es uno de los temas importantes abiertos que se utilizaran para determinar si las conexiones se podrán aceptar o no bajo ciertos requisitos (Xiaohong & MaodeMab, 2010). La transmisión óptica será apoyo para la calidad de servicio a diversas aplicaciones y la utilización eficiente de los recursos en un solo salto en redes WDM. Muchos resultados de la investigación (Yan A, 1996) (Ma Maode, 2004) se han publicado para proporcionar un servicio en tiempo real en redes ópticas WDM (Bijoy & Sarmaa Partha, 2013), así como en algunas otras redes. Sin embargo, ningún esquema se ha propuesto hasta ahora para proporcionar función de predicción de calidad de servicio en redes ópticas.

La siguiente evolución contemplara dispositivos capaces de conmutar dinámicamente, en los que las ráfagas de información irán encontrando la ruta hacia su destino conforme se propagan dentro de la red óptica. Sobrellevar esta explosión en tráfico mundial solo puede ser asegurado con la implementación de las más avanzadas tecnologías de redes de transporte ópticas con base en la aparición de los estándares de 40GbE y 100GbE (Gigabit Ethernet) en el año 2010, se vislumbra que OTN seguirá aumentando su preferencia entre los operadores de red por las ventajas que supone su implementación, y más aún, vislumbrándose para el año 2017 la salida del estándar 400GbE y/o 1TbE (Bonaventura ,

Jones , & Trowbridge, 2008) (Roese, Braun , & Tomizawa , 2006). Aprovechando las grandes capacidades de ancho de banda futuras y gracias a las herramientas de la ingeniería de tráfico aplicada a las redes ópticas se lograra la evolución hacia redes ópticas convergentes.

1.2 OBJETIVOS

La finalidad de este proyecto es el desarrollo de una metodología para aplicar métricas de calidad de servicio para redes OTN. Los objetivos principales son:

- Analizar e implementar métricas que afectan directamente la calidad de servicio sobre redes OTN.
- Validar con simulaciones la calidad de servicio en redes OTN mediante herramientas informáticas (Riverbed, NetSim, Matlab, VIP entre otras).
- Desarrollar las recomendaciones que permitan gestionar la disponibilidad y confiabilidad de la calidad de servicio aplicada a redes OTN.

1.3 RESULTADOS ESPERADOS

El impacto del proyecto se presentara a nivel local, nacional e internacional, ya que se pretende hacer una contribución a las redes de transporte óptico, además del fortalecimiento de la capacidad investigativa del grupo ***Internet Inteligente.***

Resultados esperados:

- El desarrollo de una metodología para la aplicación de calidad de servicio sobre redes OTN, enfocada en los parámetros que afectan el encaminamiento dinámico.
- Análisis de métricas que trabajan en las redes MPLS y su adaptación para el beneficio de la capa óptica.
- Simulación de una enlace óptico para aplicar métricas de la metodología y formular perder formular las recomendaciones para el avance científico de nuevas investigaciones.
- Publicación de la investigación.

2. REDES OPTICAS ELASTICAS

Un enlace óptico se compone de una fibra óptica y un nodo con todo el equipamiento necesario para poder establecer, enrutar, y eliminar conexiones ópticas a través de las fibras de la red. Este equipamiento de la red añade una nueva dimensión a la topología del grafo: la capacidad. Un enlace de fibra óptica tiene una capacidad útil que denominaremos espectro o ancho espectral (S), que se mide en GigaHerzios (GHZ) y que viene caracterizado en gran parte por el tipo de equipamiento instalado en los nodos.

Las conexiones ópticas son caminos que se crean en la red y permiten transmitir datos en modo fotonico. En una misma fibra se pueden transportarse varias de estas conexiones simultáneamente porque cada una de ellas ocupa una porción del espectro óptico. Es decir, si dividimos el espectro en varias longitudes de onda, cada una de ellas solo podrá soportar una conexión en un momento dado. Esta multiplexación es la que da a las redes ópticas de una gran capacidad para el transporte de datos.

En la actualidad la tecnología de transporte óptica OTN utiliza la multiplexación por longitud de onda (WDM). Esta tecnología es capaz de transportar múltiples canales (entre 40-80 en *Dense Wavelength Division Multiplexing* - DWDM) en una misma fibra basándose en portadoras de distintas longitudes de onda.

Una petición de conexión consta de la siguiente información: nodo origen, nodo destino y ancho de banda a transportar generalmente expresado en Mbps o Gbps. Para establecer estas conexiones ópticas se debe resolver el problema denominado de enrutamiento y asignación de espectro (routing and spectrum assignment, RSA). El objetivo es encontrar una ruta que contenga espectro suficiente para albergar el ancho de banda demandado por el cliente, estableciéndose si esa capacidad libre existe o rechazándose en caso contrario.

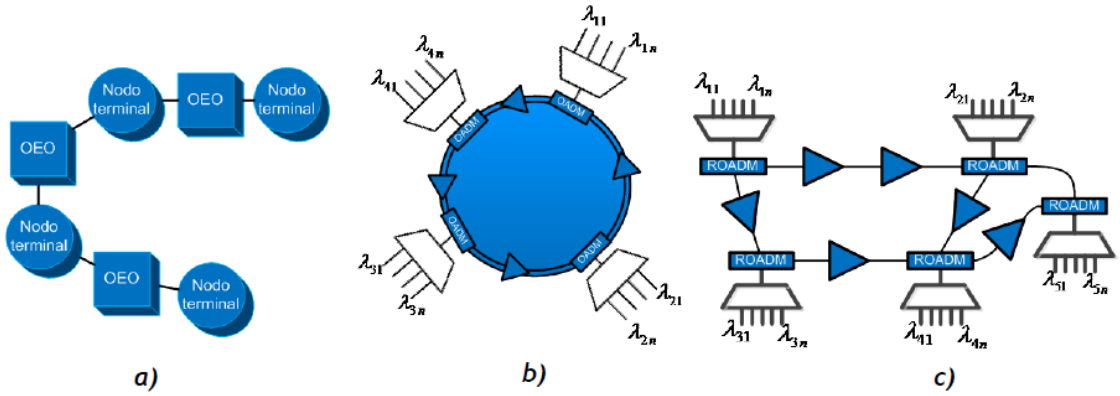
Recientemente formatos de modulación multiportadora como ***Modulación por división de frecuencias Ortogonales*** (OFDM), están atrayendo la atención para abordar el problema de eficiencia del espectro (Yaohui, Wei, Weiqiang , & Wei, 2010). Estas técnicas multiportadora permiten la transmisión de canales de gran capacidad mediante la división en subportadoras de menor velocidad multiplexadas conjuntamente a través de la red.

OFDM permite ajustar la velocidad de transmisión, a las necesidades del cliente, mediante la elección del número de subportadoras a transmitir.

2.1 GENERACIONES DE REDES ÓPTICAS DE TRANSPORTE

La primera generación (Figura 1a) se implementó a mediados de los años 90's, se basa en enlaces punto a punto, con etapas de regeneración completas óptico-eléctrico-óptico (*OEO, Optical-Electrical-Optical).* Los costos de operación eran muy altos, además de que era muy complicado hacer actualizaciones y escalar la red. Su fin práctico fue ampliar el ancho de banda de tecnologías de cobre por un factor de 40, pero cuando se agotó el ancho de banda, estos sistemas se tornaron inflexibles (Puerto Leguizamón , Ortega , & Capmany, 2008).

Figura 1 Generaciones de redes de Transporte



Fuente: (R. C., H. , & T. H. , The evolution of optical systems: Optics everywhere, 2000).

La segunda generación (Figura 1b) implementó topologías en forma de anillos fijos, con la ayuda de dispositivos de red llamados *OADM (Optical Add-Drop Multiplexer)* que permitían asignar ancho de banda fijo a una serie de longitudes de onda, además de extraer y añadir canales al sistema *DWDM*. Se empezaron a utilizar los amplificadores de fibra óptica dopados con erbio, mejor conocidos como *EDFAs (Erbium Doped Fiber Amplifier),* eliminando etapas de electrónica en sistemas ópticos, trayendo como consecuencia que el ancho de banda creciera abruptamente y se ahorraran muchos costos. Sus desventajas fueron que con los *OADM,* ecualizar los canales era una tarea pesada, era muy complicado expandir la red y no podían asignar dinámicamente el ancho de banda, algo que con la

Internet era muy inconveniente, ya que siempre han existido ráfagas de información que no pueden ser enrutados por los sistemas de segunda generación, dando paso a los de tercera generación.

Los sistemas de tercera generación (Figura 1c) han venido evolucionando de una configuración punto a punto, a malla, gracias a que los *OADM* pudieron ser reconfigurables (*ROADM*) trayendo muchas ventajas, que los *carriers* agradecieron en demasía. El *ROADM (Reconfigurable Add-Drop Multiplexer)* tiene por fin añadir y extraer información en un punto dado, pero con las ventajas de ser reconfigurable por software, asignar el ancho de banda de manera dinámica, además de ecualizar y supervisar cada canal de manera remota evitando modificaciones de la red *in situ*, que trae por consecuencia que los técnicos especializados sólo den soporte en caso de fallas a los elementos de red y no para actualizar o reconfigurar la misma.

2.2 OPTICAL TRANSPORT NETWORK

Las tecnologías OTN residen en la capa física en el modelo de comunicación de interconexión de sistemas abiertos (OSI). OTN es una capa de tecnología de red 1 (L1) que soporta interfaces de medios físicos. Los equipos OTN se utilizan principalmente en el núcleo de la red con el fin de construir la red L1 regional y nacional. OTN también se puede utilizar en la red de acceso para proporcionar servicios con ancho de banda altos incluyendo clientes en negocios de Internet, educación y gobierno. OTN proporciona una eficiencia significativa y flexible para los operadores al acomodar varias señales de cliente a tasas de longitud de onda, dentro de OTN la unidad de datos de canal óptico (ODU) ofrece un servicio eficiente de envasado, gasto de operación y mantenimiento. La multiplexación en ODU se utiliza para desacoplar la velocidad de bits de los servicios y de las longitudes de onda utilizadas para soportar los servicios, lo que permite a los operadores optimizar la parte WDM de la OTN independiente de los servicios. La tecnología WDM actual permite longitudes de onda para ser transportados sin amplificación y regeneración (3R) sobre varios cientos o miles de kilómetros, lo que aumenta aún más los beneficios para los operadores. Uno de los factores clave para la transmisión WDM de alta velocidad de larga distancia es la corrección de errores hacia delante (FEC).

Los operadores seguirán dependiendo de la OTN para proporcionar a los futuros servicios de red. Las siguientes son las motivaciones principales para influir en la evolución de OTN:

- **Cambio del tráfico de voz a servicio de datos**

El tipo de transporte que requiere el tráfico está cambiando de voz a datos. Hoy en día, hay muchos tipos de tráfico de datos (por ejemplo, correo electrónico, mensajes de texto, navegación web, vídeo, IPTV).

- **El crecimiento del tráfico**

Con el creciente uso de los servicios basados en Internet el tráfico de red está creciendo rápidamente generado con la demanda de ancho de banda en cualquier momento y en cualquier lugar. La mejora en Servicios para empresas, diversos requisitos de enrutamiento y la computación distribuida son entre otros ejemplos que generan mayor demanda de tráfico de red.

- **Nuevos servicios bajo demanda de ancho de banda variable**

Han surgido nuevos tipos de servicios tales como IPTV y vídeo bajo demanda. Estos servicios no son sólo los servicios de banda ancha; sino que también tienen necesidades de la demanda de ancho de banda variable.

- **Evolución de la conectividad física de TDM a Ethernet (1 / 10GbE)**

La conectividad de servicios de transporte se basa tradicionalmente en la tecnología TDM. IEEE 802.3 especifica los estándares para interfaces Ethernet que se están convirtiendo rápidamente en el tipo de servicio predominante para los hogares, oficinas y centros de datos. Como las velocidades de bits para las interfaces Ethernet aumentaron de 10 Mb / s a 1 Gb / s y 10 Gb / s.

- **Aparición de Ethernet de mayor velocidad (40/100 GbE)**

Después de la estandarización de 10 GbE en 2002, la creciente demanda de ancho de banda y la necesidad de la agregación de mayor velocidad ha llevado a la IEEE a iniciar la normalización de Ethernet de alta velocidad. El nuevo estándar de 40 GbE y 100 GbE se completó en junio de 2010. Como los routers comienzan a utilizar estas interfaces Ethernet de mayor velocidad, la red de transportes tendrá que proporcionar conectividad a estas tasas.

- **Diversidad de los nuevos tipos de señales de cliente CBR(constant bit rate)**

A pesar de que las interfaces de SONET y SDH se han generalizado, señales Ethernet se han convertido en uno de los clientes de RBC dominantes. También están surgiendo varios

otros tipos de señales de cliente **CBR**, tales como fiber Chanel, la interfaz digital en serie (SDI), y la interfaz de la radio pública común (CPRI).

2.3 TRAFICO DINAMICO

Las redes ópticas se despliegan con el objetivo de proporcionar servicio de conectividad a clientes. Esta conectividad se realiza mediante el establecimiento de caminos, creando una conexión entre dos extremos de la red, que permanece establecida durante un tiempo hasta que se elimina. Este funcionamiento es similar al de las redes telefónicas, donde se establece una conexión para una llamada entre dos abonados, la conexión permanece establecida durante el tiempo que dura la conversación y se deshace o elimina al final, liberando recursos en la red que podrán ser utilizados por otras conexiones.

Precisamente de las redes telefónicas proviene el término de **inten*sidad de tráfico (I)*** para medir la cantidad media de conexiones que satisface una red en un cierto instante de tiempo. De forma genérica, consideraremos que las peticiones de conexión que llegan a un nodo de la red siguen una distribución de Poisson con una tasa de **llegada λ**, cuya inversa se define como ***inter-arrival time (iat).*** Por otra parte, el tiempo que esa conexión permanece establecida sigue una distribución exponencial con tasa de **servicio μ**, cuya inversa se denomina ***holding time (ht)*.** Entonces, la intensidad se calcula según la Ecuación 1, donde la unidad de medida es el Erlang.

Ecuación 1 Intensidad de tráfico

$$I = \frac{ht}{iat}$$

Una característica básica de las redes de telefonía que dieron lugar a toda esta teoría de tráfico dinámico (ITU) es que las conexiones tenían un ancho de banda fijo e idéntico. En redes elásticas, como ya hemos visto, según sea la petición de ancho de banda, la conexión ocupará un tamaño de espectro diferente. Eso nos lleva a concluir que la intensidad no es suficiente para caracterizar el tráfico transportado en la red. Por eso, definimos el perfil de tráfico (TP) como la proporción media de peticiones de cada tipo de cliente que llega a la red. Este perfil, que tendrá como dimensión el número de clases distintas de cliente, es un vector de distribución de probabilidades cuya suma debe dar 1.

En entornos de tráfico dinámico, el grado de servicio de la red se mide con la probabilidad de que una petición de conexión no pueda ser aceptada en el momento de su llegada. Esta probabilidad se denomina probabilidad de bloqueo (PB) y es una de las figuras más usadas para evaluar la capacidad efectiva de la red. Así, podemos considerar una probabilidad de bloqueo del 1% como el valor más alto admisible para dar un servicio mínimamente decente a nuestros clientes. Aunque la red tenga capacidad sobrante, no vamos a permitir más intensidad ya que empeoraría el grado de servicio alcanzando un nivel no deseable. Otra vez aquí, nos encontramos con que no es lo mismo rechazar una demanda de 400 Gbps que una de 10 Gbps, ya que la cantidad de ancho de banda rechazado es mucho menor. Así, en redes ópticas elásticas surgen dos medidas de probabilidad de bloqueo: la parcial de cada tipo de cliente y la ponderada, haciendo uso de las proporciones del perfil de tráfico y de sus velocidades. A esta probabilidad de bloqueo ponderada se le puede llamar con mayor precisión como la proporción de ancho de banda rechazado.

Finalmente, para definir la cantidad media de ancho de banda total que transporta una red (BWtotal) en un determinado momento necesitamos conocer la intensidad global (I) y, para cada tipo de cliente i su proporción en el perfil de tráfico (TPi), su ancho de banda demandado (bwi), y su probabilidad de bloqueo parcial (PBi). Así, el cálculo se puede efectuar como sigue en la Ecuación 2. Una muy buena aproximación de BW total se puede obtener si no se considera la probabilidad de bloqueo. Esto ocurre cuando restringimos ésta a valores pequeños (e.g. 1%).

Ecuación 2 Aproximación de BW total

$$BW_{total} = I \cdot \sum_{\forall i} bw_i \cdot TP_i \cdot (1 - PB_i)$$

2.4 CONCEPTO DE REDES OPTICAS ELASTICAS Y FLEXGRID

El establecimiento de un camino de luz consiste en calcular una ruta para él a través de la topología física y asignarle la(s) longitud(es) de onda correspondiente(s) (*Routing and Wavelength Assignment: RWA*). El problema RWA ha sido objeto de numerosos estudios en los últimos años (H., J.P., & B., 2000). En general, pueden distinguirse dos aproximaciones al establecimiento de caminos de luz: el establecimiento estático (*Static*

Lightpath Establishment: SLE) y el establecimiento dinámico (*Dynamic Lightpath Establishment: DLE*) (H., J.P., & B., 2000). En el primero, los caminos de luz a establecer se conocen a priori, y el problema RWA se soluciona en tiempo de diseño. En el segundo, se supone que los caminos de luz se establecen y eliminan bajo demanda. Ahora, el tiempo de resolución es un factor crítico.

Conversión de longitud de onda (Kovacevic & Acampora, 1996): la conversión de longitud de onda significa cambiar la señal óptica de una longitud de onda a otra. Se puede eliminar la restricción de continuidad de longitud de onda y por lo tanto mejorar el rendimiento de bloqueo. Hay dos tipos: sin conversión de longitud de onda, y la conversión de longitud de onda completa. Bajo la conversión de longitud de onda completa, un camino de luz se puede configurar en un camino si cada enlace en la ruta de acceso tiene al menos un canal de longitud de onda libre.

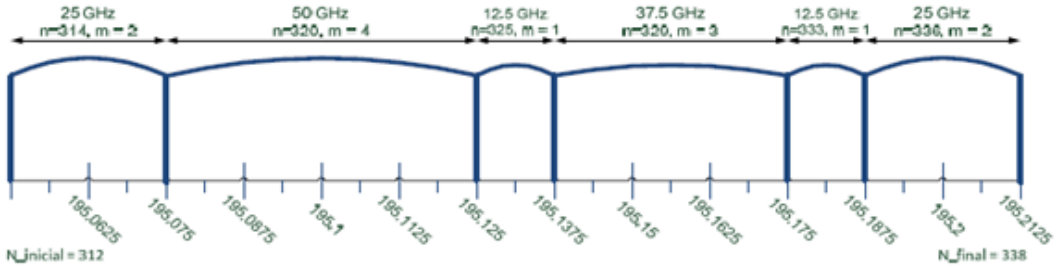
Algoritmos de Enrutamiento y Asignación de longitud de onda (RWA) (Bhide, Sivalingam, & Fabry-Asztalos, 2001): existentes resultados de investigaciones han demostrado que los algoritmos de encaminamiento adaptativos generalmente pueden lograr un mejor rendimiento que los algoritmos de enrutamiento estático. En los algoritmos de encaminamiento adaptativo, se pre-calcula un conjunto de rutas candidatas para cada nodo en la ruta origen-destino. El objetivo es elegir la "mejor" ruta de la solicitud de camino de luz en base a la información del estado de la red, tales como la distribución de la carga de tráfico.

Se pueden definir las redes ópticas elásticas como una OTN donde todo el equipamiento y el plano de control puede manejar canales ópticos de ancho de banda variable, y cuyos elementos de conmutación (*Optical Cross Connects - OXCs ó ROADMs*) pueden soportar distintas granularidades en la anchura espectral de los canales que transportan la información.

El primer cambio importante en la arquitectura de las redes ópticas elásticas es la sustitución de la rejilla fija por una nueva flexible (plano de control). La ITU-T está trabajando en una revisión del estándar G.694.1 (ITU-TG.694.1, 2012), en una división del espectro óptico flexible llamada *Flexgrid* como se observa en las Figuras 2, Figuras 3. El espectro óptico de la banda C (1530–1565 nm) es divido en ranuras (*frequency slots*) de un tamaño

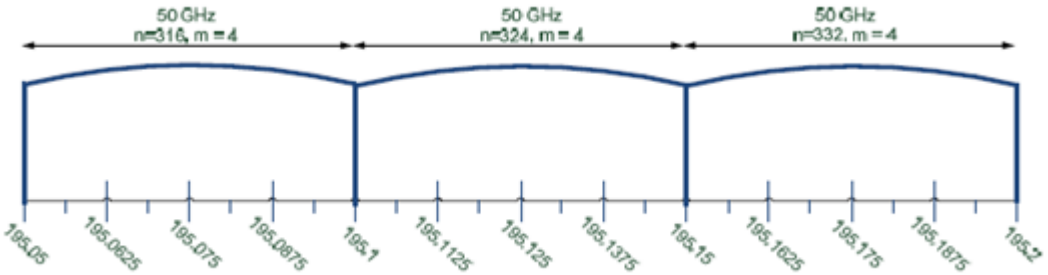
fijo (6.25, 12.5, 25, 50 GHz) (Zhang F. , Requirements for GMPLS Control of Flexible Grids, 2011), y se asigna una frecuencia central (CF) a cada *Elastic Optical Path* (EOP) que debe coincidir con el principio o el final de estas ranuras.

Figura 2 Asignación de canales en Flexgrid



Fuente: (Zhang F. , Requirements for GMPLS Control of Flexible Grids, 2011)

Figura 3 Asignación de canales en rejilla Fija de 50 GHz



Fuente: (Zhang F. , Requirements for GMPLS Control of Flexible Grids, 2011)

***Central Frequency* = 193.1 THz + n · 0.00625 THz.**

El segundo concepto es el ancho de ranura (Slot Width) que se mide en múltiplos de 12.5.

Slot Width = 12.5 GHz · m, donde m es un entero positivo.

De esta manera podemos perfectamente definir un EOP mediante estos dos únicos valores *n* y *m.* En segundo lugar hay que tener en cuenta los elementos de la red que pueden hacer posible el despliegue de este tipo de redes. Ya hemos hablado de la necesidad de que los transpondedores (transmisores ópticos) sean capaces de transmitir señales de diferente

tasa de datos, y asimismo sean capaces de transmitir diferentes formatos de señal. Esta última característica ofrece a los diseñadores de estas nuevas redes, la capacidad de adaptar el formato de la señal transmitida en función de la relación señal ruido óptica (OSNR) requerida para la longitud del EOP que atravesará dicha señal. Sin embargo queda por definir un modelo de nodo que integre por un lado los *Bandwidth Variable Transponders* (BV-T) y los *Bandwidth-Variable Wavelength Cross Connect* (BV-WXC), elementos de conmutación capaz de adaptar el ancho de banda de los filtros en función del ancho de banda del canal que los atraviese.

2.5 SISTEMAS DE TRANSMISION PARA REDES OPTICAS ELASTICAS

Las redes ópticas elásticas tienen como motivación la transmisión eficiente de canales de baja capacidad (10/40 Gbps) y la transmisión de señales de mayor capacidad (100/400 Gbps y 1Tbps). Para conseguir la transmisión de canales de baja capacidad ya se ha hablado de la necesidad de sustituir la rejilla espectral actual por una nueva de granularidad, que permita formatos de modulación con alta eficiencia espectral (EE), en bits por símbolo, sean explotados en su totalidad. En la Figura 4, se recoge un resumen de distintas formatos de señal y la ganancia (en EE) que se podría obtener aplicando *Flexgrid* con respecto a los sistemas actuales basados en rejilla de 50GHz.

Figura 4 Resumen de distintas formatos de señal y ganancia

	EE (bits /símbolo)	Data Rate (Gbps)	Baud Rate (Gbaud)	Asignación en Flexgrid (granularidad 12.5 GHz)	Asignación en rejilla fija 50 GHz	Ganancia
BPSK	1	10	11.2	11.2+10 / 2 slots	1 canal	25 vs 50 GHz = 100%
QPSK	2	40	22.4	22.4+10 / 3 slots	1 canal	37.5 vs 50GHz = 33%
16-QAM	4	40	11.2	11.2+10 / 2 slot	1 canal	25 vs 50GHz = 100%
64-QAM	6	100	18.7	18.7+10 / 3 slots	1 canal	37.5 vs 50GHz = 33%
DP-QPSK	4	100	28	28+10 / 4 slots	1 canal	50 vs 50 GHz = 0%
DP-16-QAM	8	400	56	56+10 / 6 slots	4x100Gb/s en 4 canales de 50	75 vs 200GHz = 167%
DP-64-QAM	12	400	37.4	37.4+10 / 4 slots	4x100Gb/s en 4 canales de 50	50 vs 200GHz = 300%

Fuente: (Jinno, Kozicki, Takara, Watanabe, & Sone, 2010).

Es un modelo muy simplificado en el que se estima una sobrecarga (*overhead*) del 12% en la carga útil debido a la asunción de la utilización de códigos correctores de errores (FEC) para aumentar el alcance de las señales, y una banda de guarda fija entre canales adyacentes de 10 GHz. Este dato ha sido estimado a partir de la degradación de la banda útil de la señal que se produce tras su paso a través de varios filtros en cascada. A atravesar varios filtros la atenuación que produce la imperfección de los filtros en los laterales de la banda degradan la señal reduciendo la banda útil del filtro.

En (M.Jinno, August 2010 0163), para una señal de 112 Gb/s (100Gb/s + *overhead*) y los formatos de modulación *Dual Polarization –Quadrature Shift Keying* (DP-QPSK) y *Dual Polarization – 16 Quadrature Amplitude Modulation* (DP-16-QAM), se ha efectuado un estudio de esta degradación al atravesar 10 filtros. La reducción de la banda a 3dB por debajo del valor máximo, paso de 33 GHz a 19.5 GHz, y de 45 GHz a 31.5 GHz en la respuesta equivalente del filtro que atraviesan ambas señales respectivamente. En este ejemplo se ha estimado una banda de guarda más pequeña debido a que el número de saltos medio en las redes estudiadas están en torno a 3 y 6 saltos.

Los datos recogidos muestran que la ganancia de la utilización de la rejilla flexible puede oscilar entre el 33% y el 300% en el caso *superchannels.* Llamamos *superchannels* o súper canales a un conjunto de canales ópticos muy poco espaciados espectralmente, que pueden ser enrutados conjuntamente formando un único canal lógico. Están formados por subcanales basados en formatos de modulación de una amplia eficiencia espectral gracias entre otras técnicas a la multiplexación en la polarización (*Polarization Multiplexing* - PM) de las señales y a la detección coherente en recepción (*Coherent Detection* - CD).

La generación de súper canales se realiza mediante técnicas de modulación multiportadora que van a ser explicadas en las siguientes secciones en profundidad, ya que sustentan la base teórica de la puesta en práctica de las redes elásticas.

2.6 MÚLTIPLEXACION POR DIVISIÓN DE FRECUENCIAS ORTOGONALES (OFDM)

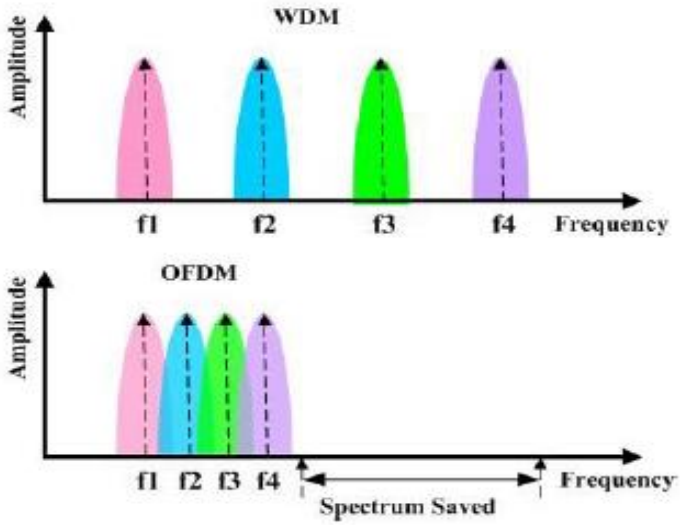
Multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) es una tecnología de modulación que ha sido ampliamente adoptado en muchos sistemas inalámbricos de banda ancha y telefonía fija. Debido a su capacidad de transmitir un flujo de datos a alta velocidad utilizando múltiples subportadoras de menor velocidad, la tecnología OFDM ofrece ventajas superiores de alta eficiencia de espectro, interferencia entre símbolos y capacidad de adaptación a las condiciones del canal de servidores, etc. . En los últimos años, se han realizado estudios intensivos sobre OFDM óptico (O-OFDM) y se considera una tecnología prometedora para la transmisión óptica de ultra-alta velocidad. Con la tecnología OOFDM una nueva arquitectura de red óptica elástica con gran flexibilidad y escalabilidad en la asignación del espectro y el alojamiento velocidad de datos podrá ser construida para soportar diversos servicios y el rápido crecimiento del tráfico de Internet en el futuro.

En comparación con los sistemas WDM, donde una separación de canales es fija entre las longitudes de onda para eliminar la diafonía, OFDM permite que el espectro de subportadoras individuales se solape, debido a su ortogonalidad, como se representa en la Figura 5. Además, la interferencia entre símbolos (ISI) de la señal OFDM puede ser mitigado como la duración del símbolo per-subportadora significativamente más larga que la de un sistema de una sola portadora de la misma velocidad.

Desde la perspectiva del espectro la condición ortogonal entre múltiples subportadoras se satisface cuando sus frecuencias centrales están espaciados n / Ts, donde n es un número entero y Ts es la duración del símbolo. Se puede ver en la Figura 6 (a) que el punto de pico del espectro de una subportadora corresponde al punto de otras subportadoras con valor cero. Por lo tanto, cuando una subportadora se muestrea en su punto máximo, todas las demás subportadoras tienen cruces por cero en ese punto y no interfieren con la subportadora que se muestrea. Esta ortogonalidad conduce a un uso más eficiente de los recursos espectrales, que se limita en la mayoría de los medios de comunicación.

En el dominio del tiempo, la señal OFDM es una síntesis de formas de onda llamadas múltiples subportadoras y consiste en un flujo continuo de símbolos OFDM que tienen un periodo de símbolo regular, como se muestra en la Figura 6(b).

Figura 5 Espectro para DWDM y O-OFDM



Fuente: (Narasimhamurthy, Banavar, & Tepedelenlioglu, 2010.)

OFDM es una forma especial de la modulación multiportadora con ortogonalidad entre cada subportadora. Una señal de múltiples portadoras de s (t) se representa como (Shieh & Djordjevic, 2010):

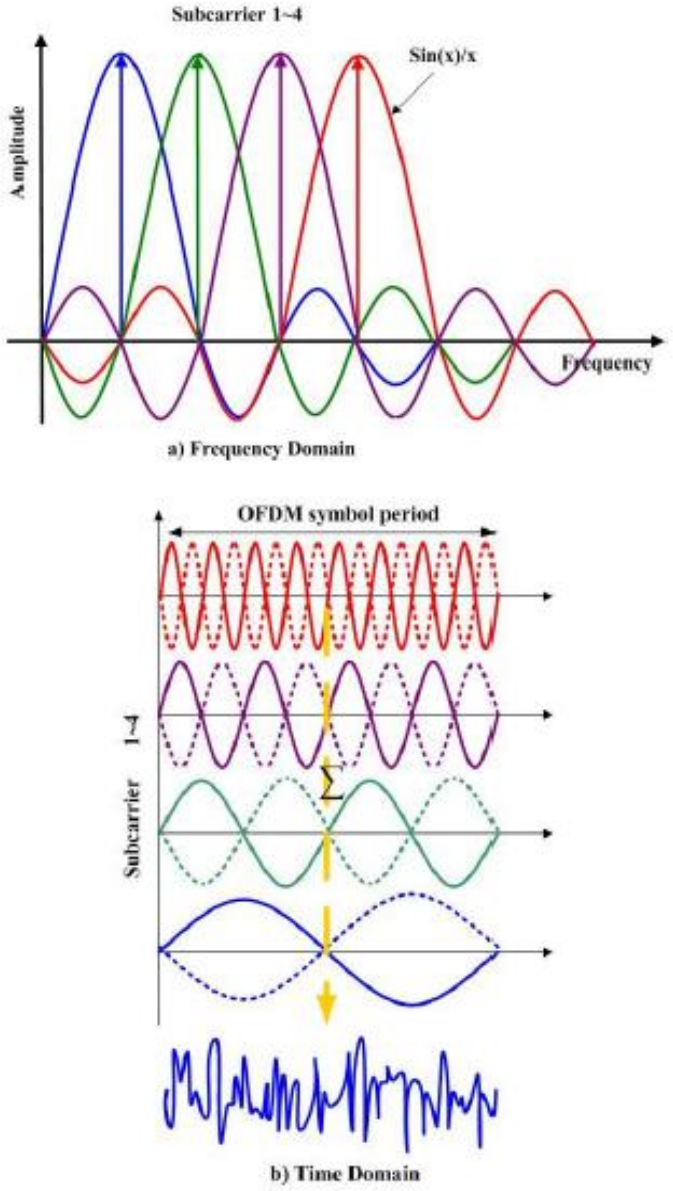
Ecuación 3 Transformada inversa discreta de Fourier (IDFT) y Transformada discreta de Fourier (DFT)

$$s(t) = \sum_{i=-\alpha}^{+\alpha} \sum_{k=1}^{N_{sc}} C_{ki} S_k(t - iTs)$$

$$S_k(t) = \prod(t) e^{j2\pi f_k t}$$

$$\prod(t) = \begin{Bmatrix} 1 & (0 < t \leq T_s) \\ 0 & (t \leq 0, t > T_s) \end{Bmatrix}$$

Figura 6 Señal OFDM en el Dominio de tiempo y espectral a) Dominio de espectro. b) Dominio de tiempo.



Fuente: (Zhang, Marc, Morea, & Mukherjee, 2013)

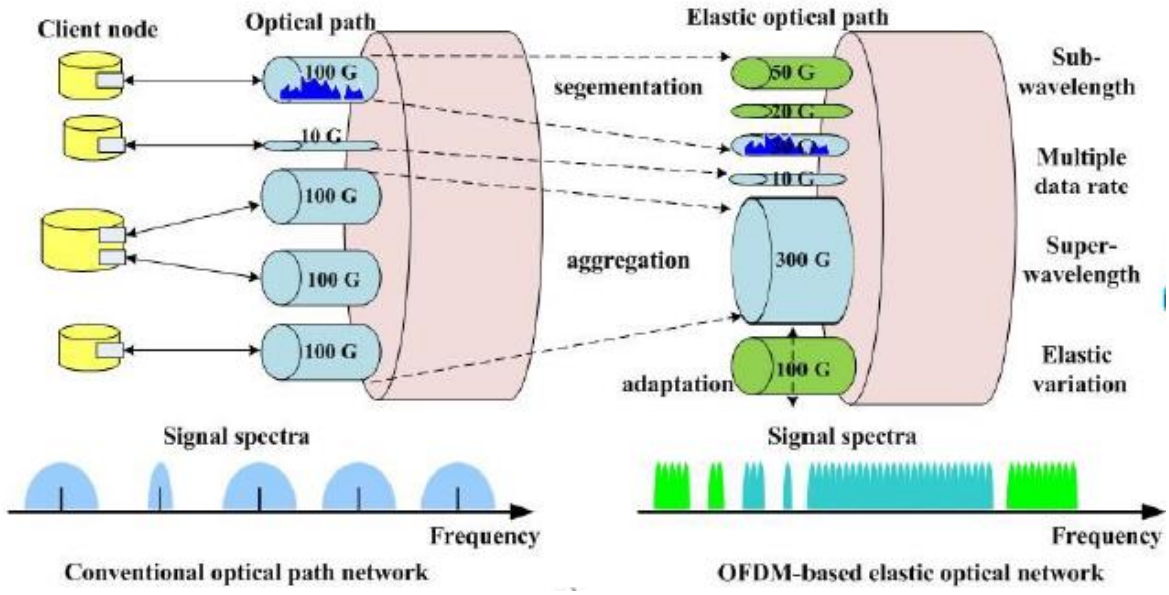
Como se observa en la Ecuación 3 Se ha demostrado que la modulación y demodulación OFDM se puede implementar utilizando la transformada inversa discreta de Fourier (IDFT) y transformada discreta de Fourier (DFT), respectivamente (Weinsten & Ebert, October

1971). El valor discreto de la señal de OFDM transmitida s (t) es una IDFT de N puntos de la símbolo de información ck y el símbolo de información recibido ck es una DFT de N puntos de la señal muestreada recibida r (t). Para reducir la complejidad computacional de FT / IDTF, eficiente rápida de Fourier y la transformada inversa rápida de Fourier (FFT / IFFT) se utilizan normalmente en los sistemas OFDM para implementar la modulación OFDM y demodulación.

2.6.1 ARQUITECTURA DE RED OPTICA ELASTICA BASADA EN OFDM

En la arquitectura de red óptica elástico basado en OFDM, caminos de velocidad de datos sobre sub-longitud o longitud de onda se realizan a través de granularidad flexible y conmutación del espectro, se hace uso de transpondedores de velocidad de datos y ancho de banda variable y WXCs ancho de banda variable.

Figura 7 Comparación entre caminos ópticos convencionales y elásticos.



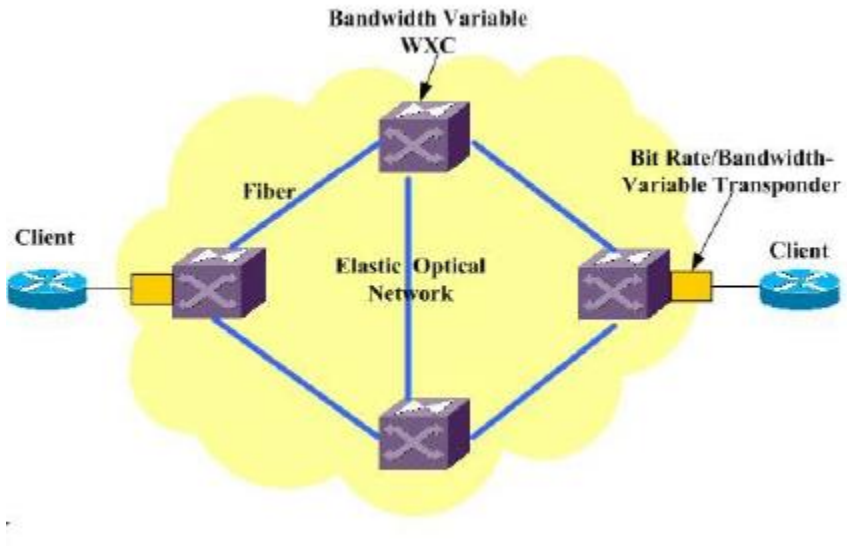
Fuente: (Jinno, y otros, Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network Architecture, Benefits, and Enabling Technologies, 2009)

El transpondedor de velocidad de datos y ancho de banda variable asigna suficiente espectro (subportadoras) para acomodar el tráfico de sub-longitud de onda conocido como

el corte de espectro. Varios canales FDM se pueden fusionar en un súper-canal, el transporte de la capacidad de un canal de OFDM individual sin banda de guarda espectro en el medio, como se muestra en la Figura 7.

Cada nodo WXC (Crossconexion de longitud de onda variable) en la trayectoria óptica asigna un crossconexión con el ancho de banda de espectro para crear un camino óptico de tamaño apropiado de extremo a extremo. Cuando aumenta el tráfico, el transmisor puede aumentar la capacidad y cada WXC en la ruta amplía la ventana de conmutación, lo que permite el paso de los datos de ancho de banda variable. La Figura 8 muestra la arquitectura de la red óptica elástico basado en OFDM.

Figura 8 Arquitectura de red óptica elástica.



Fuente: (Jinno, y otros, Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network Architecture, Benefits, and Enabling Technologies, 2009).

1. Los beneficios de esta arquitectura de red óptica elástico basado en OFDM son los siguientes:

   Soporta agregación de servicios con granularidad de tráfico flexible, permitiendo sub-longitud de onda y un alojamiento tráfico de datos multiplexados, por ejemplo en Gb / s para Tb / s.

2. Proporciona una alta eficiencia del espectro a través de la asignación de flexible de acuerdo con la tasa de transmisión de datos. Se ha comprobado que la utilización del espectro de la red óptica elástica mejora de 5 a 95% en comparación con una red WDM de la red fija, aunque la mejora precisa de la utilización del espectro depende de la topología y patrón de tráfico.
3. Es compatible con la velocidad de llegada a la línea, así como la expansión y disminución de ancho de banda dinámico, mediante ajustes en el número de subportadoras y formatos de modulación.
4. Permite realizar operaciones de eficiencia energética para ahorrar el consumo de energía al desconectar algunas de las subportadoras OFDM cuando no hay suficiente tráfico para su transmisión.

2.7 TRAFFIC GROOMING

En las redes WDM ópticas, el Traffic Grooming es una funcionalidad común, en el que múltiples solicitudes de tráfico de baja velocidad se incluyen en un camino de luz de alta capacidad. La técnica juega un papel importante en la optimización de la utilización de recursos en redes WDM.

En las redes ópticas elásticas, servicios de sub-longitud de onda podrían ser apoyados directamente por los datos de transpondedores variables en ancho de banda y de caminos ópticos elásticos. Sin embargo, en este escenario, la capacidad del transpondedor no puede ser utilizado en su totalidad, y las bandas de guarda espectrales entre los caminos ópticos de sub-longitud de onda puede generar una cantidad significativa de los gastos espectrales. Para hacer frente a estos problemas, se propone un enfoque en el acondicionamiento de tráfico en las redes ópticas elásticos basados en OFDM en (Y. , X. , Q., N., & Y., 2011), en el que múltiples solicitudes de tráfico de baja velocidad se mezclan en los caminos ópticos elásticos usando multiplexación por capa eléctrica. Se propuso una formulación MILP (Mixed Integer Linear Program) para reducir al mínimo la utilización de espectro promedio en el escenario de Traffic Grooming, ahorrando de espectro de 8-24%, sin embargo, como el enfoque de acondicionamiento de tráfico es en capa eléctrica añade conversiones y costos adicionales de OEO a la red óptica elástica.

3. DISEÑO

Los principales retos que presenta este diseño a nivel de tecnología óptica son:

1. Un buffer óptico que releve eficazmente el trabajo de las líneas de retardo (FDL).
2. Una Crossconectora óptica que realice correctamente las conversiones de longitud de onda y evite conversiones ópticas eléctricas (O/E/O), las cuales aumentan el Delay de los enlaces.
3. Transpondedores variables que generen diferentes anchos de banda.

Las redes OTN en la actualidad operan con protecciones tipo 1+1 donde se desperdicia ancho de banda y espectro óptico. Cuando se genera una falla sobre un nodo CORE todo el tráfico cursado por el mismo se indispone, afectando los niveles de servicio de la red contratada.

A continuación se relacionan los principales parámetros para tener una Red de transporte óptico con calidad de Servicio (Figura 9).

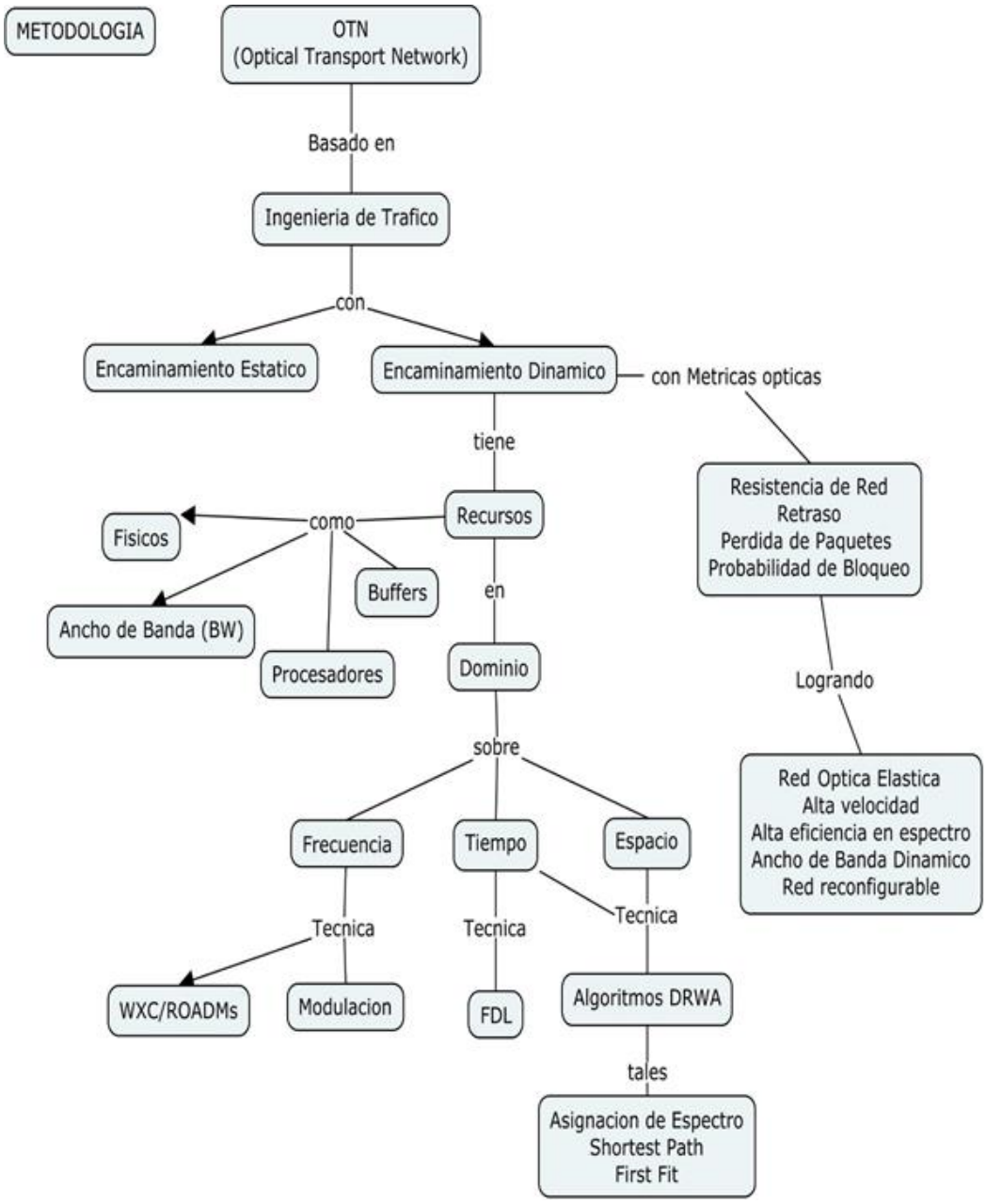
3.1 TOPOLOGIA (CAPA FISICA)

La transmisión de paquetes IP directamente sobre la red óptica WDM es conocida como tecnología IP sobre WDM, la cual permite el despliegue de redes de telecomunicación de nueva generación, que tienden a redes metropolitanas. Este tipo de redes permite sostener el crecimiento de tráfico previsto, proporcionando gran capacidad de transmisión gracias a WDM y además facilita la interconectividad con la infraestructura IP ya desplegada.

Las consideraciones para este diseño incluyen las siguientes necesidades:

- Establecer caminos viables en cuanto a la calidad de señal.
- Equilibrar la carga de red evitando la congestión en los nodos.
- Regenerar la señal para obtener mayores prestaciones de red.
- Limitar la complejidad del algoritmo para disminuir el retardo en tiempo real.

Figura 9 Mapa Conceptual de la Metodología

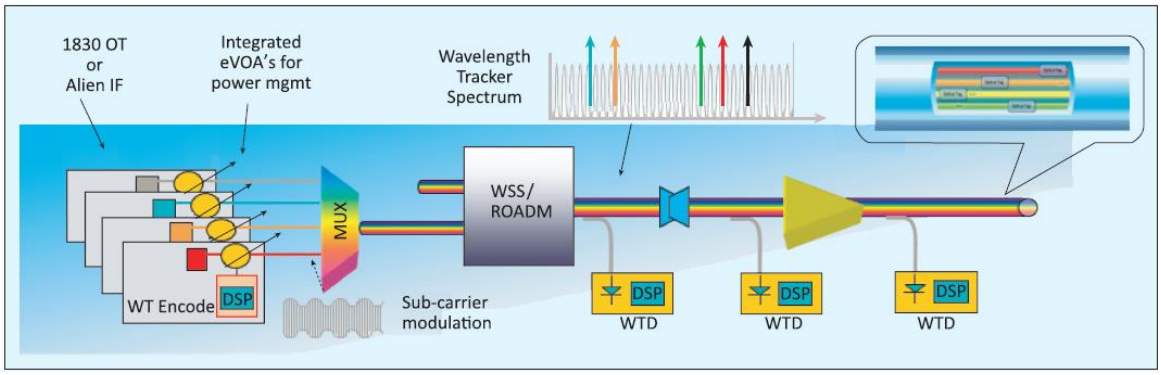


Fuente: Creación propia

En nuestro diseño la topología del núcleo de la red es en malla, basado en la conexión de multiplexores reconfigurables ópticos de agregación y desagregación de tráfico (ROADM). Mediante el mallado entre ROADMs (Figura 10) es posible el despliegue de una

infraestructura óptica universal que soporte múltiples topologías de red, se trata de la provisión de redes privadas virtuales que se superponen sobre la infraestructura óptica.

Figura 10 Esquema de funcionamiento del rastreador de longitud de onda



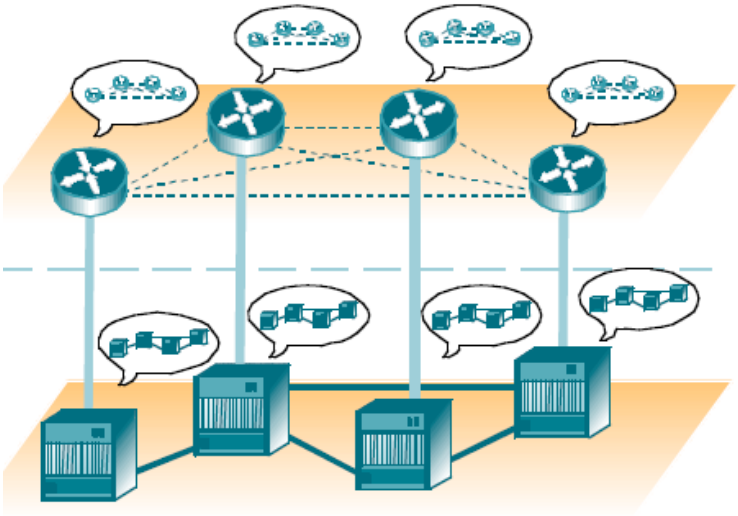
Fuente: (ZHANG, Xiaobo1, LIU, & J. , April 2013)

A nivel de diseño de nuestros nodos se implementa la técnica de OTN basado en rebanadas de espectro (SLICE), se emplea la topología de malla (Figura 11) para nuestra red óptica debido a las necesidades del OXC. En SLICE el camino óptico de extremo a extremo es asignado por un ancho de banda óptico del tamaño adecuado en cuanto al recurso espectral necesario sobre la ruta dad e la red. Cuando implementamos una interfaz de 40 GbE y la utilización de la interfaz de 10 Gbps, la transmisión genera una señal óptica con el tamaño del espectro adecuado de 10 GHz y cada WXC óptica sobre el camino de la ruta asigna crosconexiones con el mismo ancho de banda de 10 GHz. La señal se distribuye por un WSS con el fin de obtener las trayectorias con el número deseado de subportadoras en cada nodo WXC para añadir canales. En la Figura 12 se observan 6 nodos con la característica de SLICE, donde el nodo A entrega un servicio al nodo C con un BW 140 Gbps y en la WXC del nodo C la WCC lo multiplexa con otros canales para ser enviado a D en una subportadora con las características de ancho de banda solicitado.

En cada nodo de conmutación OXC se tiene un controlador de módulo en el cual residen una base de datos TED (Traffic Engineering Database) local para almacenar medidas de efectos físicos y un controlador de conexión óptico ("*Optical Connection Controller*", OCC), que solicita conexión al algoritmo RWA y que reciba como respuesta el "*camino óptico*" asignado. Este conmutador OXC recibe la señal compuesta de la multiplexora y distribuye

cada una de las lambdas al camino de la amplificadora que indica el algoritmo, esta labor la realiza por medio de la crossconectora óptica y los switchs ópticos.

Figura 11 Topología de malla



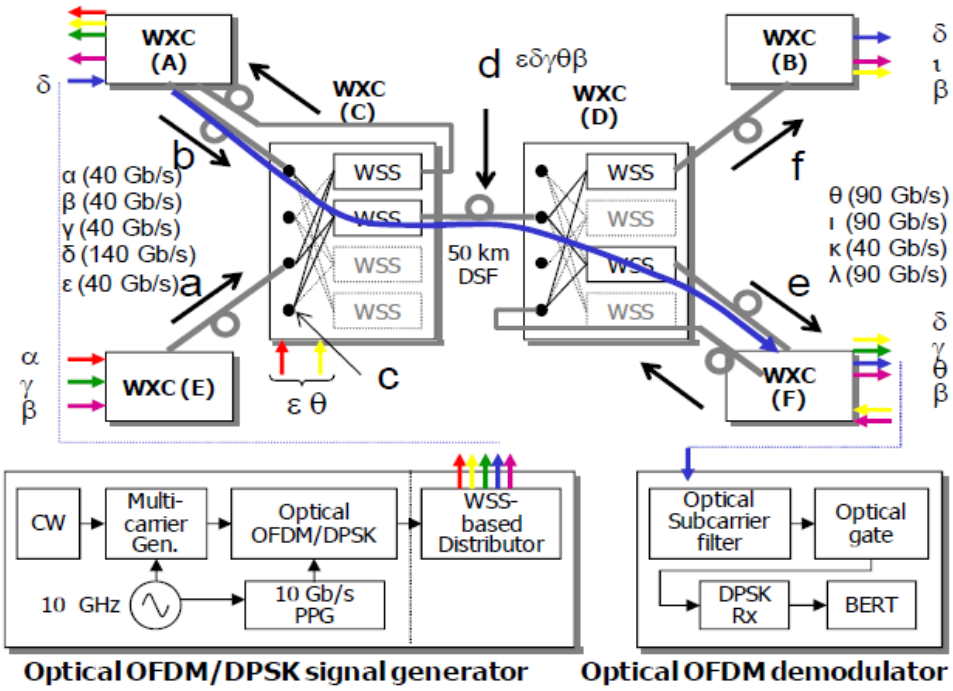
Fuente: Creación Propia

El encaminamiento de los “caminos ópticos” se realizara mediante algoritmos RWA (Figura 13) en la capa óptica. En las siguientes secciones se propone un algoritmo óptico DRWA Heurístico basado en el camino de menor costo (“Shortest-Path”), que permite el establecimiento de caminos ópticos en redes OTN.

En la RFC-4054 se consideran los efectos físicos (Tabla 1) en la algoritmia RWA:

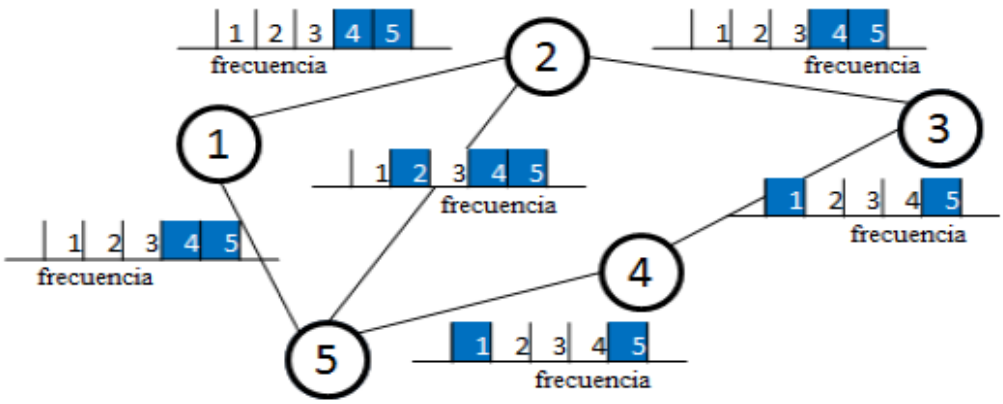
- Efectos físicos de dispersión cromática, concatenación de filtros (aunque dependiendo de la tecnología de filtrado), OSNR, y PMD, que se consideran de gran impacto.
- Efectos no lineales como FWM, SPM, y XPM, que se consideran de importancia media.

Figura 12 SLICE



Fuente: (Jinno, Takara, Kozicki, & Tsukishima, Demonstration of Novel Spectrum-Efficient Elastic Optical Path Network with Per-Channel Variable Capacity of 40 Gb/s to Over 400 Gb/s, 2008)

Figura 13 Topología Ejemplo RWA



Fuente: (Leiva, N. , Beghelli , & Olivares, NOV. 2015)

Tabla 1 Efectos Físicos

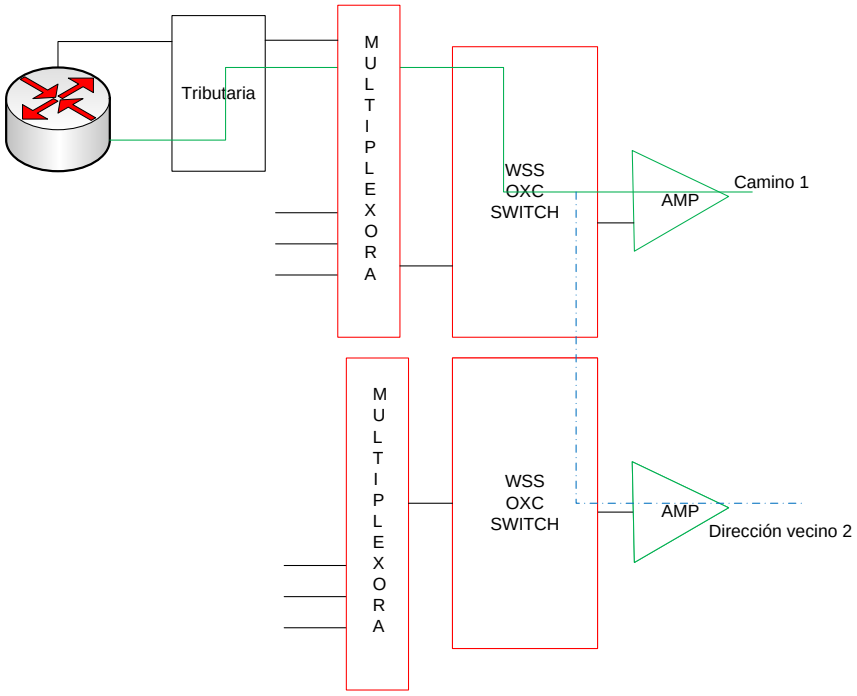
Efectos físicos lineales	Efectos físicos no lineales
Atenuación	Auto modulación de fase SPM
Pérdidas de inserción	Modulación cruzada de fase XPM
Ruido de emisión espontánea de amplificación	Mezclado de cuatro ondas FWM
Dispersión cromática / Dispersión de velocidad de grupo	Mezclado de cuatro ondas SBS
Dispersión de modo de polarización	Esparcimiento estimulado Raman SRS
Pérdidas dependientes de polarización	
Diafonía intra e inter canal	
Concatenación de filtros	

Fuente: Creación Propia

En nuestro caso se presenta la topología para establecimiento de caminos ópticos en tiempo real, que involucra las tareas de encaminamiento y asignación de longitud de onda en tiempo real ("Dynamic Routing and Wavelength Assignment", DRWA).

En la Figura 14 se observa la topología de un nodo para nuestro diseño donde el servicio del cliente se conecta a una tarjeta tributaria que convierte el servicio a un longitud de onda en la capa OTU2, luego pasa a la multiplexora donde se combinan todas estas longitudes de onda en una señal compuesta para entregarla sobre la crossconectora (con funciones de WSS, OXC, switch) donde se calcula la ruta de la demanda. Por último la señal compuesta pasa por el bloque de amplificación donde se le da la potencia para llegar al nodo vecino y continuar con el enrutamiento o la descarga del servicio.

Figura 14 Topología de Nodo



Fuente**:** Creación Propia

3.2 ALGORITMO HEURISTICO DRWA

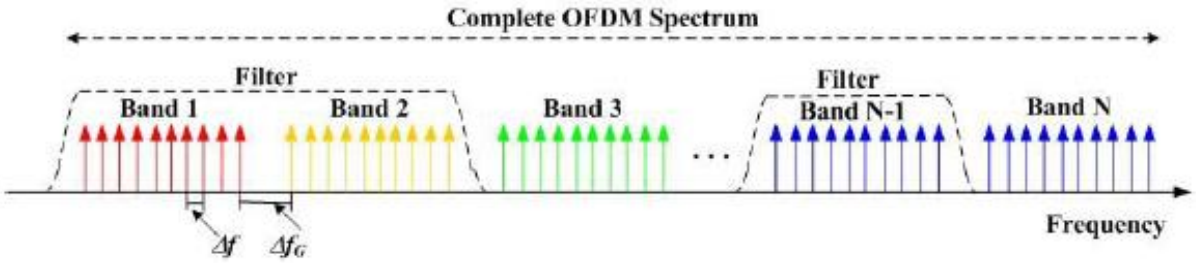
Para establecer una trayectoria óptica elástica que utiliza un ancho de espectro flexible para acomodar servicios de tráfico multi-datos, los algoritmos de encaminamiento y longitud de onda tradicional de asignación (RWA) de redes OTN ya no son directamente aplicables, se necesitan nuevos algoritmos dinámicos de encaminamientos y asignación de espectro (DRWA).

En el Algoritmo DRWA propuesto la restricción de longitud de onda en las redes OTN tradicionales se transforma en una restricción en espectro de continuidad. Una conexión que requiere una capacidad que satisface la asignación de un número de ranuras de subportadoras contiguas. Para distintas rutas a través de subportadoras WXCS se tiene un rendimiento aceptable de la señal en el lado del receptor, canales OFDM adyacentes como se observan en la Figura 15 deben ser separados por bandas de guarda en el espectro, cada una de las cuales ocupa normalmente un número entero de ancho espectro de

subportadora. La característica de modulación adaptativa de la tecnología O-OFDM ofrece la flexibilidad de elegir formatos de modulación y adaptación del ancho de espectro de la señal de acuerdo con la distancia de transmisión.

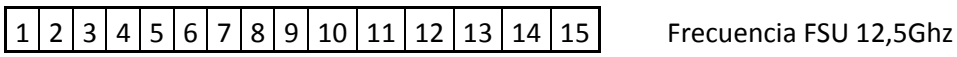
Para este caso, el espectro es divido en trozos pequeños, denominados FSU (**Frecuency Slot Unit**), por ejemplo, de 12,5 GHz. Ante una solicitud de conexión entre dos nodos, el algoritmo de asignación de espectro SA, asigna un determinado número de FSUs consecutivos en función del requerimiento de espectro a través de una ruta. El concepto de FSU y su posterior asignación, se ilustra en la Figura 15. En la Figura 16(a), a modo de ejemplo, se divide y enumera el espectro en 16 FSUs (de 0 a 15), con un ancho de banda de 12,5 GHz cada uno. En la Figura 16(b), se ejemplifica la asignación de FSUs para 3 conexiones con distintos requerimientos de ancho de banda.

Figura 15 O-OFDM canales adyacentes

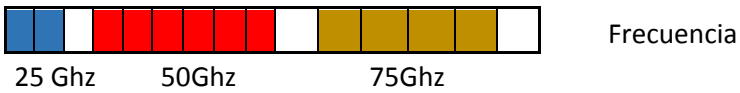


Fuente**:** (Miroslaw & Careglio, 2011)

Figura 16 a) Concepto de FSU b) Asignación de Espectro



(a) Grilla flexible con FSU de 12.5 Ghz



(b) Asignación Flexible del espectro

Fuente**:** Creación Propia

Cada asignación de FSUs debe satisfacer tres restricciones. La primera es la continuidad de espectro a través de la ruta, la cual implica que el mismo espectro debe ser asignado en

cada enlace que compone a la ruta; la segunda restricción consiste en que los FSUs asignados deben ser consecutivos y; la tercera es asegurar que un FSU no sea asignado a más de un camino espectral en un mismo enlace (Miroslaw & Careglio, 2011).

Para la separación del camino de espectro de extremo a extremo se utilizara un librería de algoritmo denomina firstFit, la cual tiene como objetivo, asignar un bloque completo de FSUs disponibles que posean exactamente la cantidad requerida de espectro para cada petición de conexión a lo largo de una ruta candidata. A modo de ejemplo, en la Figura 16(b) se pueden apreciar 3 bloques de FSUs disponibles que inician por la numeración 2, 9 y 14. En caso de no existir un bloque que se ajuste al espectro solicitado, el algoritmo asigna el bloque que tenga el número de FSUs más cercano al de la solicitud de conexión.

3.2.1 ALGORITMO FIRST-FIT

Funciona de la siguiente manera:

- Se numeran las longitudes de onda.
- Cuando se requiere de una longitud de onda, (“λ”), a lo largo de un conjunto de enlaces que forman un camino, se comprueba la disponibilidad de las longitudes de onda empezando por la de menor numeración hasta encontrar una longitud de onda disponible, (“λ”). Se selecciona dicha longitud de onda, (“λ”).

Prestaciones:

- Tiene un costo computacional inferior que R, sobre todo cuando la red está poco cargada, ya que sólo se tendrá que comprobar la disponibilidad de un pequeño conjunto de longitudes de onda hasta encontrar la primera de ellas disponible.
- De la misma forma que R, esta técnica no introduce sobrecarga “overhead”.

Los problemas NP-hard no tienen algoritmos polinomiales por lo que un algoritmo que los resuelva en forma exacta puede tardar un tiempo prohibitivo. Así que debemos conformarnos con algoritmos polinomiales que den soluciones aproximadas. Existen dos categorías de tales algoritmos: algoritmos de aproximación y algoritmos heurísticos. APX-Complete son los que ($P \neq NP$) y no tienen aproximaciones polinómicas para pequeños valores $\in (aproximacion\ del\ algoritmo)$. Como ejemplos son los problemas de la

ubicación de nodos, enrutamiento integral, o el coste mínimo en un problema de árbol de multidifusión. El algoritmo de este diseño es de tipo Heurístico donde ($P \neq NP$).

3.2.2 EXPLICACIÓN DEL ALGORITMO EEM

El algoritmo EEM (Encaminamiento, Espectro, Modulación) se diseña con el objetivo de proporcionar una solución completa, eficaz y realista al problema RWA, mediante algoritmia heurística.

Mediante el algoritmo se atiende a las tareas R y WA de forma separada, garantizando el funcionamiento de la malla fotónica en tiempo real. El algoritmo heurístico esta para resolver el problema de enrutamiento, espectro, asignación de modulación con la colocación de regeneradores, en red Óptica OTN elástica. El objetivo del encaminamiento mediante "Shortest-Path" es minimizar el coste de los enlaces utilizados en el camino.

Las restricciones impuestas sobre la ruta seleccionada pueden ser de los siguientes tipos:

- Restricciones mínimo/máximo: se exige que el valor mínimo/máximo de una cierta métrica sea mayor/menor que un cierto valor, en todos los enlaces del camino. Por ejemplo podría requerirse que los enlaces tengan un ancho de banda mínimo disponible.
- Restricciones adicionales: son restricciones en la métrica como costo, retardo y número de saltos. Son restricciones adicionales sobre los enlaces del camino.
- Restricciones de inclusión/exclusión: en este tipo de restricciones se incluyen/excluyen nodos o enlaces de un cierto tipo.

Un algoritmo de camino de menor costo seguiría la siguiente estructura:

1. Crear el grafo de la topología.
2. Ejecutar el algoritmo de Dijkstra y comprobar si se cumplen las restricciones en el camino. Si se cumplen devolver el camino.
3. Encontrar el siguiente camino más corto (Pi) utilizando el algoritmo "k-Shortest Path".
4. Si (Pi) satisface las restricciones devolver el camino.
5. Si el número de caminos encontrados es mayor que ("k"), no devolver ruta.

6. Iterar con el paso 3.

Características

1. Cada nodo óptico de red se supone que es un Add/Drop multiplexor WDM.
2. Cada enlace de red en la capa WDM se supone que es una fibra óptica.
3. El espectro en las fibras se supone que está compuesta de una serie de intervalos de frecuencia, cada ranura o ranuras de frecuencia correspondería a un canal de longitud de onda.
4. Dos lambdas que utilizan ranuras de frecuencias superpuestas no pueden atravesar la misma fibra, ya que sus señales se mezclarían.
5. Cada demanda de tráfico es una necesidad de transmitir una cantidad de Gbps entre dos nodos.
6. Una demanda de tráfico se puede realizar usando una o más lambdas.
7. Cada lambda producida se devuelve como un protección de 1 + 1. Que se pueden utilizar para proteger otros caminos ópticos.
8. Cada lambda comienza y termina en un transpondedor. velocidad de línea en Gbps (típicamente 10, 40, 100 y múltiplos de redes flexi-grid).

Tolerancia

1. Los caminos ópticos establecidos debería ser suficiente para transportar el tráfico de todas las demandas cuando hay falla.
2. Se aceptan las pérdidas si la red sufre fallos en los enlaces o nodos.
3. Todas las demandas de tráfico deben ser satisfechas
4. La protección 1 + 1 SRG-disjuntos: Esta es otra forma de proporcionar un solo SRG tolerante a fallos. Cada camino óptico está respaldada.

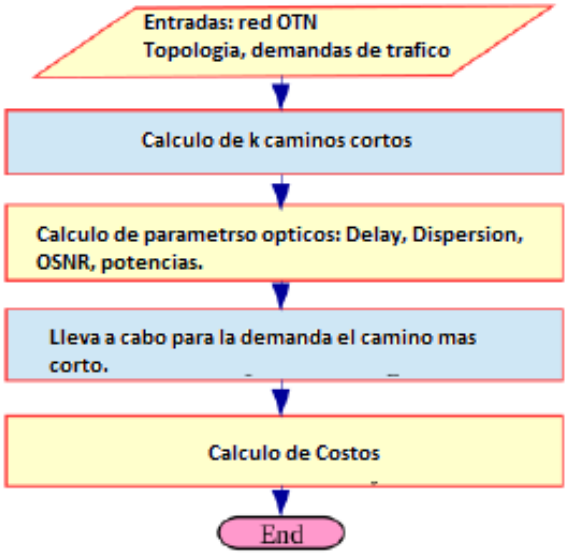
De acuerdo a las métricas abordadas en este proyecto se generó un algoritmo Heurístico (Figura 17) con las librerías del software Net2plan para la implementación mediante simulación.

Algoritmo EEM (Encaminamiento, Espectro, Modulación)

1. Inicialización P_d^R (Demandas, Nodos, Enlaces, Lambdas)
2. Repeat
3. Generar listas de caminos : $1 + 1\ P_d^R$
4. WDM calcula los regeneradores
5. $\boldsymbol{for\ all}\ d \in D\ \boldsymbol{do}$
6. P_d^P es el camino principal de acuerdo a las métricas.
7. P_d^b es el camino Secundario de acuerdo a las métricas.
8. End
9. **Until** Un nuevo Demandas, Nodos, Enlaces, Lambdas sea adicionado

Este tipo de algoritmo heurístico de encaminamiento está sujeto a una serie de restricciones no triviales de forma independiente a lo considerado en la función de costo. Por ejemplo, una restricción podría ser el retardo total del camino. Otra restricción podría ser la inclusión o no de ciertos nodos. Este tipo de problemas son NP-completos.

Figura 17 Diagrama de Flujo del algoritmo



Fuente**:** Creación Propia

El código JAVA del algoritmo se encuentra en el Anexo A.

3.3 CALIDAD DE SERVICIO OPTICO

QoS (Calidad de Servicio) son parámetros que juegan un papel clave en la selección y optimización de recursos de manera eficiente. En la Figura 18 se encuentra la clasificación global de las métricas de calidad de servicio. En la Recomendación UIT-T E.800 se define la calidad de servicio como el efecto colectivo de rendimiento de un servicio donde se determina el grado de satisfacción de un usuario. Esta definición de QoS incluye aspectos tales como atención al cliente, la fiabilidad del servicio, el rendimiento del servicio y la seguridad del servicio. La parte de interpretación de la definición QoS se describe por el Grado de servicio (GoS), que se define en E.600 como un número de variables de ingeniería de tráfico para proporcionar una medida de la idoneidad de un grupo de recursos en condiciones especificadas. Estas variables pueden ser probabilidad de pérdida de paquetes, retardo de extremo a extremo, delay-jitter, etc.

La fiabilidad de servicio: Es la disponibilidad de un servicio (tiempo en que un servicio está disponible), la tasa de fallo de un servicio (con qué frecuencia un servicio falla), la tasa de reparación (el tiempo que tarda en estar el servicio operativo de nuevo), entre otras medidas.

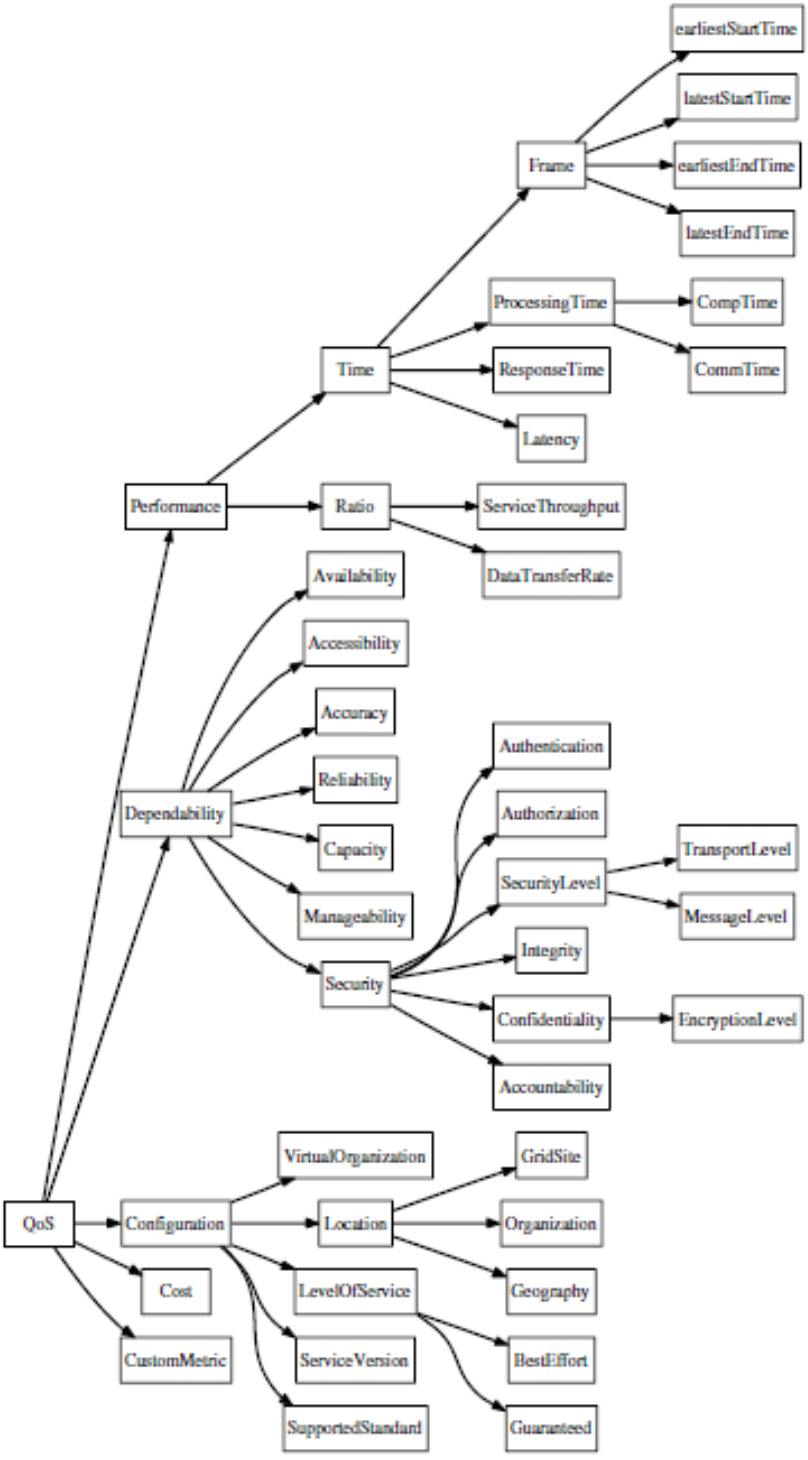
La seguridad de un servicio: Es la disponibilidad y la fuerza de los algoritmos criptográficos para mantener información oculta, la posibilidad de asegurar la integridad de la información (estar seguro de que no se ha cambiado), la posibilidad de autenticar la información ha sido enviada (las firmas digitales), y otras medidas.

Prestación de un servicio: Es el rendimiento del servicio, la tasa de pérdida (la información que se pierden en la comunicación), y la distribución del retardo de información enviada a través de una red.

3.3.1 PROBABILIDAD DE BLOQUEO

La probabilidad de Bloqueo se mejora minimizando la cantidad de demandas no atendidas. En nuestro diseño de redes de transporte óptico basado en circuitos, la probabilidad de bloqueo es un parámetro clave para evaluar el rendimiento de la red debido a la alta exigencia de calidad de servicio de los usuarios.

Figura 18 Clasificación Global de Métricas de Calidad de Servicio



Fuente: (Truong, Samborski, & Fahring, 2006) .

En el análisis, la probabilidad de bloqueo es la tasa de la cantidad de conexiones rechazadas por la red para el número total de conexiones. La estimación de la probabilidad de bloqueo de una red óptica es muy importante para el diseño, la planificación y optimización.

El bloqueo de un camino óptico se debe a la capacidad de la red o información obsoleta durante el proceso de señalización para distribuir longitudes de onda en el enrutamiento de las redes ópticas (K-J & G-Xi , May 2002). Muchos Documentos se han centrado en el problema de los RWA (Enrutamiento y Asignación de longitud de onda) para mejorar el rendimiento de bloqueo de las redes ópticas WDM. El problema de RWA se puede resolver de dos maneras: Primero dividirlo en dos sub problemas que son el encaminamiento y la asignación de longitud de onda, o tomarlo como un todo (Redes ópticas elásticas).

Las redes ópticas elásticas, tienen como principal característica de operación, la división y asignación flexible del espectro óptico para establecer conexiones entre nodos. Los dispositivos ópticos en este tipo de redes, tienen la capacidad de trabajar con caminos espectrales (Spectrum Paths), los que consisten en una señal óptica con velocidad de transmisión y formato de modulación variable (ancho de banda variable) en función de la distancia de transmisión.

El tráfico ofrecido por una red se compone de un conjunto de demanda de tráfico $\mathfrak{D}$, cada demanda $d \in \mathfrak{D}$ representa un flujo de tráfico. Se denota a $a(d)$ como el nodo donde se genera el flujo d y $b(d)$ es el nodo o nodos donde se dirige el flujo. Ningún nodo puede ser el origen y destino de la misma demanda $a(d) \cap b(d) = \emptyset$. Se usa h_d como la intensidad de demanda d ofrecida.

Hay tres tipos de demandas de demandas de tráfico (Ejemplo en Figura 19) en las redes ópticas:

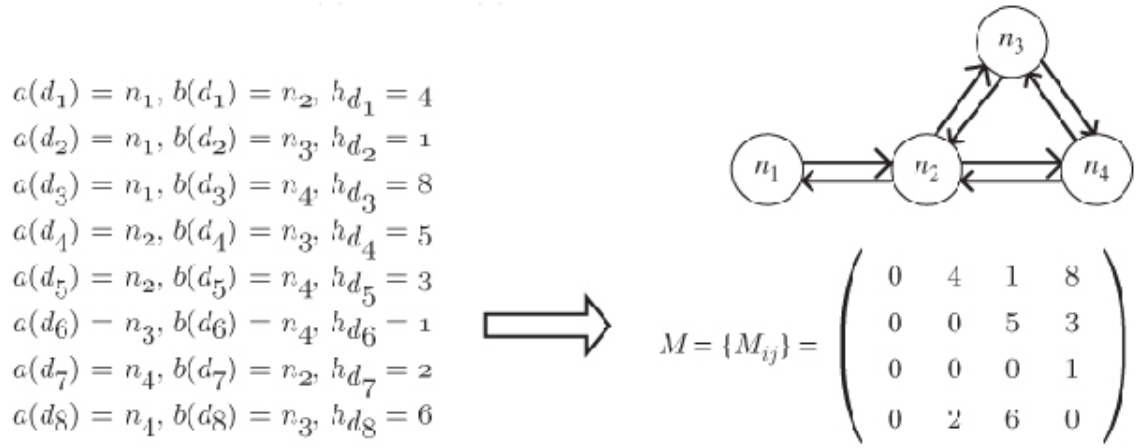
Unicast: Es cuando la demanda d inicia en un nodo y finaliza en otro donde $|\boldsymbol{a}(\boldsymbol{d})| = \mathbf{1}$, $|\boldsymbol{b}(\boldsymbol{d})| = \mathbf{1}$.

Multicast: Una demanda d es multicast si es del tipo $1 - k$ y el flujo de tráfico se genera en un nodo $\boldsymbol{a}(\boldsymbol{d})$ y k copias exactas del flujo de tráfico atravesaran la red para k destinos $\boldsymbol{b}(\boldsymbol{d}) = \boldsymbol{k}$. Por tal razón $|\boldsymbol{a}(\boldsymbol{d})| = \mathbf{1}$, $|\boldsymbol{b}(\boldsymbol{d})| = \boldsymbol{k}$.

Anycast: Una demanda d es de tipo Anycast cuando uno o varios nodos generan la demanda de tráfico y entregado a uno o varios nodos. $|\boldsymbol{a(d)}| = \boldsymbol{j}$.

Broadcast: Una demanda d Broadcast es un tipo de demanda Multicast, en un nodo $|a(d)|$ a todo el resto de la red.$|\boldsymbol{b(d)}| = \boldsymbol{N} - \boldsymbol{a(d)}$

Figura 19 Ejemplo Matriz M creada de una lista de demandas



Fuente: (Pavon Mariño, 2016)

En una red de conmutación de circuitos como en nuestro diseño de red óptica OTN una demanda *d* es el origen de una solicitud conexión de arribo aleatorio, ocupando una cantidad determinística de ancho de banda S_d en cada enlace que atraviesa. El promedio de intensidad en Erlangs de cada demanda h_d está dada por:

Ecuación 4 Intensidad de cada demanda

$$h_d = s_d \frac{\lambda_d}{\mu_d}$$

Donde λ_d es el número de conexiones solicitadas por unidad de tiempo, μ_d^{-1} es el tiempo promedio de espera de conexión y s_d es la cantidad de ancho de banda consumido por conexión. Cuando la conexión no encuentra un camino con disponibilidad esta es bloqueada.

- **Probabilidad de bloque de enlace:** la probabilidad de bloqueo Be es la misma para todas las demandas y está dada por la fórmula de Erlang-B.

Ecuación 5 Probabilidad de bloqueo Be

$$Be = E_b[Y_e, U_e] = \frac{\frac{Y_e}{U_e!}}{\sum_{k=0}^{U_e} \frac{Y_e^k}{k!}}$$

$Y_e = \sum_d Y_{de}$ Es la totalidad de tráfico ofrecido en el enlace.

U_e Es la capacidad de enlace.

- **Demanda y probabilidad de bloqueo en la red:** la demanda en la probabilidad de bloqueo B_d provee la probabilidad de rechazar una conexión de una demanda dada, mientras el promedio de bloqueo B de la red esta ponderado como el promedio de una fracción de tráfico rechazado por la red.

Ecuación 6 Probabilidad de bloqueo en la red

$$\boldsymbol{B = \frac{1}{\sum_d hd} \sum_d hd\ Bd}$$

Un cálculo exacto de la probabilidad de bloqueo para la demanda de la red se obtiene administrando la interacción de las diferentes demandas a través de los enlaces aceptando una o más posibles rutas para la conexión. Para las redes de transporte óptico por cada enlace de amplificadora punto a punto se pueden tener 40 o más canales.

Ecuación 7 Probabilidad de Bloqueo de un camino

$$Bp = 1 - \prod_{e \in p} (1 - B_{ep})$$

Fuente:

En una red de clase simple donde se tiene $B_{ep} = B_e,\ \forall p$

Ecuación 8 Probabilidad de no encontrar un camino en el enlace

$$\sum_{e \in p} Bep$$

Fuente:

Se asume que todos los enlaces en un camino p son iguales a la cantidad de h_p (promedio de intensidad) de oferta de tráfico. Por lo tanto se pueden usar algoritmos para computar los valores de B_{ep} como la sumatoria de los tráficos que atraviesan el camino.

Algoritmo de Kaufman-Robert recursión

1. $g(c) = 0, c < 1; g(0) = 1$
2. $\boldsymbol{for\ all}\ c = 1, \dots\dots, u_e\ \boldsymbol{do}$
3. $g(c) = \frac{1}{c}\sum_d Y_{de} g(c - Sd)$
4. $\boldsymbol{end\ for}$
5. $G = \sum_{c=0}^{u_e} g(c)$
6. $B_e(d) = \frac{1}{G}\sum_{i=1}^{sd-1} g(C - i), \forall d\ \in D$
7. ***return*** $\{B_e(d), d\ \in D\}$

Con este algoritmo se pueden observar diferente probabilidades de Bloqueo debido a los valores de demandas Sd, para las redes ópticas elásticas cada demanda viaja por una longitud de onda y este algoritmo aplica para cada enlace.

En el encaminamiento alternativo, donde cada demanda tiene una lista pre computada y ordenada de rutas como es el caso de la matriz e rutas de nuestro algoritmo, cuando hay una petición de conexión, se elige el primer camino disponible en la lista y la solicitud está bloqueada sólo si todos los caminos no están disponibles. En otros esquemas de encaminamiento cuando más de una ruta de acceso está disponible para una conexión la elección no depende de un orden predefinido, pero si en el estado actual de la red. Este es el caso de la llamada de enrutamiento menos congestionada (LCR). En LCR, una medida de la congestión se calcula para cada ruta admisible, la congestión de ruta se define como la capacidad en el enlace a cruzar con menos capacidad.

La estimación de las probabilidades de bloqueo es difícil en encaminamiento de rutas alternas y de adaptación, pero a su vez, se han presentado un gran número de estimaciones basadas en métodos numéricos, para diferentes tipos de enrutamiento.

3.3.2 PROBABILIDAD DE PERDIDA DE PAQUETES

Para reducir la perdida de paquetes en las redes ópticas se debe modificar o agregar sistemas en el sistema de modulación ya que en los sistemas ópticos convencionales de una única portadora, a medida que aumenta la velocidad de transmisión, el requisito para una óptima precisión del muestreo de temporización se vuelve cada vez más crítica.

Saltos temporales excesivos pondrían el punto de muestreo lejos del óptimo, provocando un grave error. Por otra parte, para las redes ópticas elásticas (OFDM), un muestreo en tiempo con tanta precisión no es necesario. Mientras se selecciona una "ventana" apropiada de puntos de muestreo que contengan un símbolo OFDM no contaminada, es suficiente con eliminar la interferencia entre símbolo (ISI). Sin embargo, esta tolerancia a la imprecisión en el punto de muestreo tiene como contrapartida el requisito estricto de una ausencia de desplazamiento en frecuencia y de una reducción del ruido de fase en sistemas OFDM.

- **Formulación matemática**

En un sistema OFDM genérico, cualquier señal puede ser representada como en la Ecuación 3, En donde la C_{ki} es el i-ésimo símbolo de información en la k-ésima subportadora, la S_k es la forma de onda para la subportadora k-ésima, la f_k es la frecuencia de la subportadora, la Ts es el período de símbolo, y la $\prod(t)$ es la función conformadora de pulsos.

Como detector óptimo para cada subportadora se podría utilizar un filtro que coincida con la forma de onda de la subportadoras, o un correlador adaptado a la subportadora. Por lo tanto, la información del símbolo detectado C_{ki} a la salida del correlador viene dada por:

Ecuación 9 Salida del correlador.

$$C'_{ki} = \frac{1}{Ts}\int_{o}^{Ts} r(t - iTs)S_k^* dt = \frac{1}{Ts}\int_{o}^{Ts} r(t - iTs)e^{-j2\pi f_k t} dt$$

En donde la $r(t)$ es la señal recibida en el dominio del tiempo. Normalmente en la modulación multiportadora se utilizan señales limitadas en bandas no superpuestas y puede

ser implementado con un gran número de osciladores y filtros, tanto en el transmisor como en el receptor final. La principal desventaja de esta implementación es que requiere un ancho de banda excesivo. Esto es porque para diseñar filtros y osciladores con una buena relación eficacia precio, la separación entre canales tiene que ser múltiplo de la velocidad de símbolos, reduciendo en gran medida la eficiencia espectral. OFDM se investigó empleando un conjunto de señales que solapaban en el espectro pero que aun así eran ortogonales en tiempo. Esta ortogonalidad se origina a partir de la correlación directa entre cualquiera de las dos subportadoras, dada por el siguiente desarrollo:

Ecuación 10 Origen de la ortogonalidad a partir de la correlación

$$\delta_{kl} = \frac{1}{Ts}\int_0^{Ts} S_k S_l dt = \frac{1}{Ts}\int_0^{Ts} e^{j2\pi(fk-fl)^t dt}$$

$$\delta_{kl} = e^{j\pi(fk-fl)Ts}\frac{sin\pi(f_k - f_l)Ts}{\pi(f_k - f_l)Ts}$$

Se puede observar que si la condición de la ecuación 11 se satisface las dos subportadoras son ortogonales entre sí. Esto significa que estos conjuntos de subportadoras ortogonales, con sus frecuencias espaciadas un múltiplo de la inversa del tiempo de símbolo, se pueden recuperar con los filtros adaptados sin interferencia entre portadoras (ICI), a pesar del fuerte solapamiento espectral de la señal.

Ecuación 11 Subportadoras son ortogonales entre sí

$$f_k - f_l = m\frac{1}{Ts}$$

Para nuestro caso de estudio se implementara ODFM antes de la tarjeta tributaria con el fin de evitar las perdidas aumentando el tiempo de símbolo y transportado por OTN elástico.

3.3.3 DELAY

En redes de conmutación de circuitos la aleatoriedad de los orígenes refleja la velocidad en el flujo de paquetes observado en los enlaces. Esto es el origen del retraso en almacenamiento en los nodos y descarte de paquetes cuando el buffer se empieza a llenar.

$$T_e = Delay\ en\ el\ enlace$$

$$Te^b = tiempo\ del\ paquete\ en\ el\ buffer$$

Te^b Depende de la capacidad del enlace U_e, depende del promedio de la intensidad de tráfico y de las otras propiedades estadísticas del tráfico.

$$Te^t = retraso\ promedio\ de\ transmision.$$

Te^t Es el tiempo necesario de transmisión del paquete cuando ha salido del buffer, está dado por la longitud del paquete en bits (L) y la velocidad de transmisión de enlace U_e.

$$Te^p = retraso\ en\ la\ Propagacion.$$

Te^p Es el tiempo que necesita la señal electromagnética en alcanzar el nodo final de enlace. Esta dado por la proporción entre la distancia del enlace d_e y la velocidad de propagación.

Ecuación 12 Delay total

$$T_e = T_e^b + T_e^t + T_e^p$$

- **Modelo de tráfico de Poisson**

Asume que el tráfico ofrecido en cada enlace es un flujo de paquetes donde el tiempo entre dos paquetes consecutivos son ejemplos independientes de una distribución exponencial negativa. Esta suposición es soportada por el Teorema de Palm-Khintchine. Establece un supuesto de multiplexación en el enlace de un largo número de fuentes de paquetes de renovación independiente.

Si el tamaño de los paquetes es independiente de una distribución general, el promedio de retraso en almacenamiento estaría dado por Pollaczek-Khimchine M/G/1.

Ecuación 13 Promedio de retraso en almacenamiento

$$T_e^b = \frac{L}{U_e}\frac{\rho_e}{2(1-\rho_e)}\ (1 + CV_L^2)$$

CV_L Coeficiente de variación (desviación estándar dividida por la media de la longitud del paquete)

U_e Capacidad de enlace en bps

ρ_e Promedio de utilización del enlace Y_e/U_e

Si el tamaño del paquete tiene una distribución exponencial $CV_L^2 = 1$, la expresión previa resultara en el bien conocido M/M/1

- **Auto - similaridad de Trafico**

La estimación de retraso dada por el modelo de tráfico de Poisson es una aproximación óptima con respecto a lo que es monitoreado en las redes reales, ya que la probabilidad de ráfagas largas decae exponencialmente en el modelo de Poisson. Las ráfagas tienden a saturar los enlaces y empeoran los retrasos por almacenamiento y la probabilidad de paquetes descartados Ecuación 14.

Ecuación 14 Retraso promedio proporcional a la longitud del paquete.

$$Te^b = (L/U_e)\frac{{\rho_e}^{1/2(1-H)}}{(1-\rho_e)^{H/(1-H)}}$$

H parámetro de Hurts [0.5,1)

- **Retraso de extremo a extremo**

El promedio de tráfico atravesando un enlace de extremo a extremo está dado por:

$$Tp = \sum_{e \epsilon p} Te$$

Si el tráfico es multicast y el camino es multicast tree routing el retraso extremo a extremo puede ser diferente para distintos destinos $n \epsilon b(p)$.

El retraso máximo experimentando por el flujo de tráfico de diferentes destinos Ecuación 15.

Ecuación 15 Retraso máximo

$$T_p = \max_{n \epsilon b(p)} \left\{ \sum_{e \epsilon \rho_n} Te \right\}$$

3.3.4 RESISTENCIA DE RED

Es un término que describe la habilidad de la red de proveer y aceptar niveles de servicio, incluso en presencia de fallas o ataques. Este es un aspecto crítico en el diseño de redes. Los SLA (service Level Agreements) para redes de transporte están en 99,9% y 99,999 % en aproximación es de 5 minutos por año.

La disponibilidad está dada por la Ecuación 16:

Ecuación 16 Disponibilidad

$$A = \frac{MTBF - MTTR}{MTBF}$$

MTBF es el tiempo medio entre fallas.

MTTR es el tiempo medio en reparaciones.

Hay dos opciones de evitar la afectación de tráfico:

- **Protection Recovery**: En este caso la recuperación esta pre-planeada y pre-señalizada en la red donde la reacción a las fallas es muy rápida (10ms – 1s).
  En la protección tipo 1+1 el tráfico se conecta a través del camino primario ρ y la protección por el secundario ρ', el origen envía dos copias de trafico uno por cada camino y en caso de falla en el camino principal el receptor el reconfigurado para recibir el trafico proveniente del camino de backup.
  El camino backup puede estar configurado para recibir o transmitir tráfico de baja prioridad cuando el camino principal está operativo y en caso de falla este tráfico de baja prioridad es desbordado.
  M (backups): N (Principales)

- **Restoration Recovery:** En esquemas de restauración, la acción de recuperación no está planeada pero es decidida después de una falla. Esto permite el máximo de flexibilidad decidiendo cual es la recuperación más eficiente sobre el actual estado de la red.

En el algoritmo de encaminamiento EEM se relacionan dos rutas para cada tráfico siendo similar a la Protección 1+1 pero la ruta de protección solo se separa en el momento de una falla y la decisión del camino se realizara de acuerdo con el estado actual de la Red.

3.4 PLANO DE CONTROL

Es necesario un plano de control (CP) en toda red óptica para gestionar fallos, re-planificaciones periódicas y todos los requerimientos de operación, administración y mantenimiento. Por ejemplo se Requiere plano de control en una red para aprovisionar recursos de forma rápida y flexible que es una de las principales solicitudes de los operadores de red.

Para la estandarización del plano de control dos organismos han participado en la estandarización.

- Organismo ITU: La propuesta (“Automatically Switched Optical Network”, ASON) (ITU).
- Organismo IETF: La propuesta (“Generalized Multi Protocol Label Switching”, GMPLS) (IETF, October 2004.).

Mientras que en la propuesta ASON se define la arquitectura del plano de control, sus requisitos y funcionalidades, independientemente del protocolo utilizado, mediante la propuesta GMPLS se define una serie de protocolos específicos para el plano de control.

Los protocolos del plano de control GMPLS que se realizaran en la capa óptica por el algoritmo EEM se enuncian en la Tabla 2.

Los algoritmos incluidos como librerías en el diseño del algoritmo EEM de este proyecto realizan funciones similares a los protocolos del plano de control de GMPLS el cual evoluciono de la tecnología MPLambdas.

Tabla 2 Protocolos de un plano de control

Protocolos de plano de control GMPLS	Aplicación	Algoritmo EEM (Encaminamiento, Espectro, Modulación)
El protocol ("Resource Reservation Protocol-Traffic Extension", RSVP-TE) que incluye: 1. "Neighbor Discovery Protocol", NDP [39]. 2. "Link State Advertisements", LSA.	Se utiliza para crear y anunciar las topologías de red entre los nodos y funciones de señalización. Los protocolos NDP y LSA realizan funciones de descubrimiento de vecinos y señalización mediante intercambio de anuncios entre enlaces, respectivamente.	Reserva el path para el tráfico de acuerdo a Shortest-Path y firstFit
El protocolo de gestión de enlaces "Link Management Protocol", LMP	Realiza la gestión de recursos: el control de conectividad de canales, verificar la conectividad de enlaces y aislar fallos de enlaces.	WSS y OXC
El protocolo "Open Shortest Path First- Traffic Extension", OSPF-TE	Se utiliza para el encaminamiento.	Shortest-Path y OXC

Fuente: Creación propia

Algoritmo "First-Fit", FF Selección de la primera longitud de onda disponible y Minimiza la probabilidad de bloqueo. Tiene la función del protocolo OSPF-TE ya que al seleccionar la primer longitud de onda ayuda en el encaminamiento

Algoritmo Shortest Path Minimiza el costo total del camino. Con el objetivo Minimiza el costo total del camino. Tiene la función del protocolo RSVP-TE ya que en su matriz de carga de rutas almacena la señalización de la red y define que caminos son los más óptimos dependiendo el tipo de tráfico.

4. SIMULACION

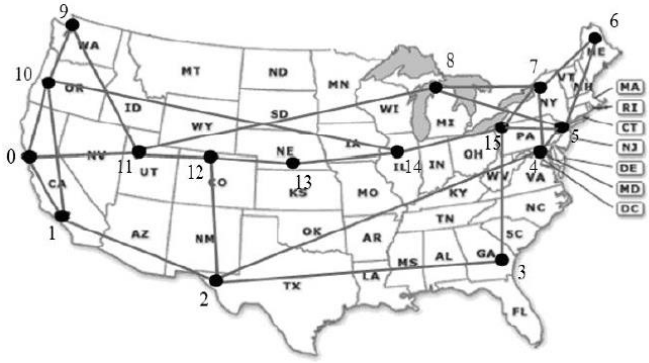
En este capítulo vamos a presentar las simulaciones llevadas a cabo en este trabajo, se tendrán en cuenta las distintas técnicas presentadas en el capítulo anterior, y se probarán con distintos parámetros, como pueden ser el nivel de modulación o la tasa de tráfico ofrecido. Este capítulo también servirá como puerta introductoria al último capítulo en el que se recogerán los resultados aquí presentados a modo de conclusión.

4.1 TOPOLOGIAS DE RED

El algoritmo DRWA EEM (Encaminamiento, Espectro, Modulación) que contiene dos algoritmos como librerías (First-Fit Wavelength Assignment", Shortest path) propuesto para un núcleo de red OTN funciona para cualquier topología de red y matriz de tráfico. Como ya se apuntaba en el capítulo anterior una topología de red adecuada ha de ser mallada para favorecer la conectividad entre los nodos. Para el estudio en este proyecto se considera las siguientes topologías malladas sobre las que se realizaron las simulaciones del algoritmo:

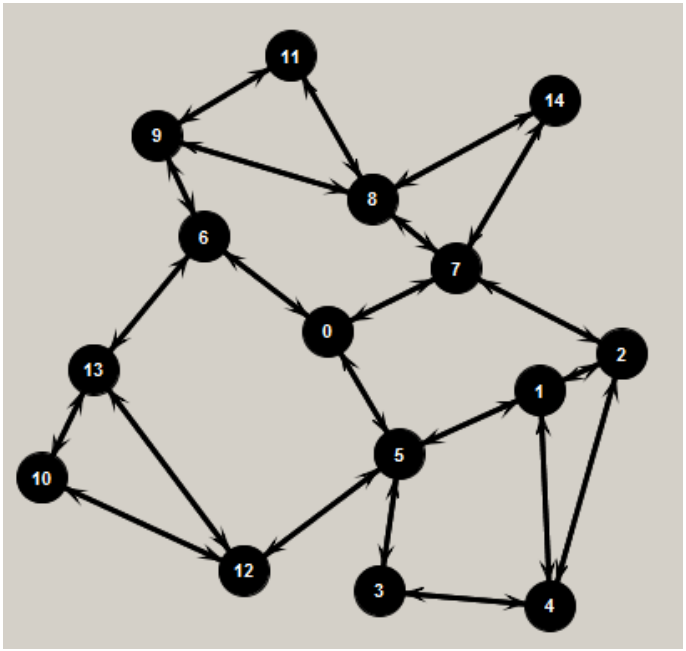
1. NSFNET (National Science Foundation Network), 14 nodos y 42 enlaces Figura 20.
2. Atlanta Network, 15 nodos y 44 enlaces. Figura 21.
3. EON (European Optical Network), 18 nodos y 66 enlaces. Figura 22.

Figura 20 NSFNET



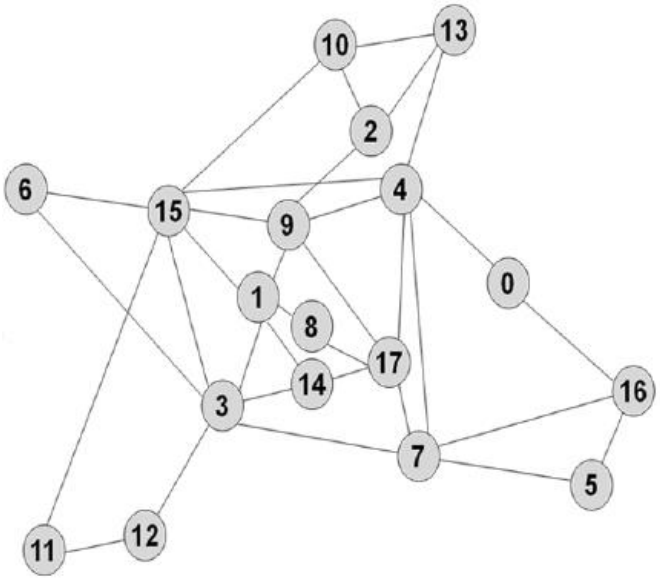
Fuente: (Center, 2014).

Figura 21 Atlanta Network



Fuente: creación propia.

Figura 22 European Optical Network (EON)



Fuente: creación propia.

4.1 SIMULADOR

La simulación se realizara en la herramienta Net2plan debido a la robustez que presentan para el diseño de topologías, tráfico e implementación de algoritmos. A continuación se detalla las características de tres simuladores de red óptica.

4.1.1 NET2PLAN

Net2Plan es un software basado en Java de código abierto, público y disponible para descargar desde su página web (Pavón Mariño & Izquierdo Zaragoz, 2011). Está disponible bajo la Licencia Pública General de GNU (LGPL).

Net2Plan tiene sus orígenes en septiembre de 2011 como un recurso para los cursos de planificación de la red de la Universidad Politécnica de Cartagena. En 2013 fue utilizado durante más de 50 horas de trabajo de laboratorio en dos cursos de graduación de más de 150 estudiantes.

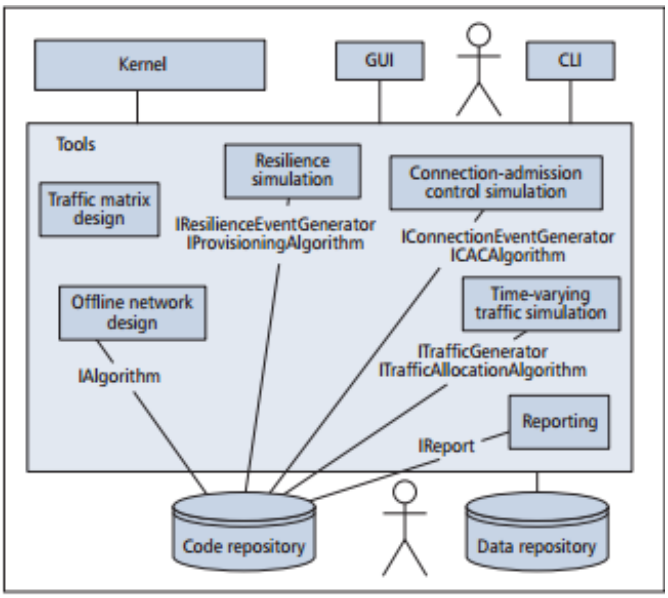
Net2Plan está diseñado con el objetivo de superar las barreras impuestas por las herramientas de planificación de redes existentes por dos razones principales: los usuarios no se limitan a la ejecución de algoritmos incorporados, pueden integrar sus propios algoritmos, aplicables a cualquier instancia de red, como las clases de Java de ejecución (Figura 23); Net2Plan define una representación de red, el llamado plan de red, basado en conceptos abstractos como nodos, enlaces, las demandas de tráfico, rutas, segmentos de protección, los grupos de riesgo compartido y las capas de red. La información relativa a tecnologías puede ser introducido a través de atributos definida por el usuario conectados a los nodos, enlaces, y así sucesivamente, en el plan de red. La combinación de una parte independiente de la tecnología y los atributos relacionados con la tecnología proporciona la flexibilidad requerida para modelar cualquier tecnología de red dentro de Net2Plan.

4.1.2 NS2

NS–2 es un simulador de redes basado en eventos discretos. NS es ampliamente utilizado como herramienta educativa y de investigación. Probablemente NS2 es el simulador de redes de código abierto más extendido en investigación como para propósitos docentes,

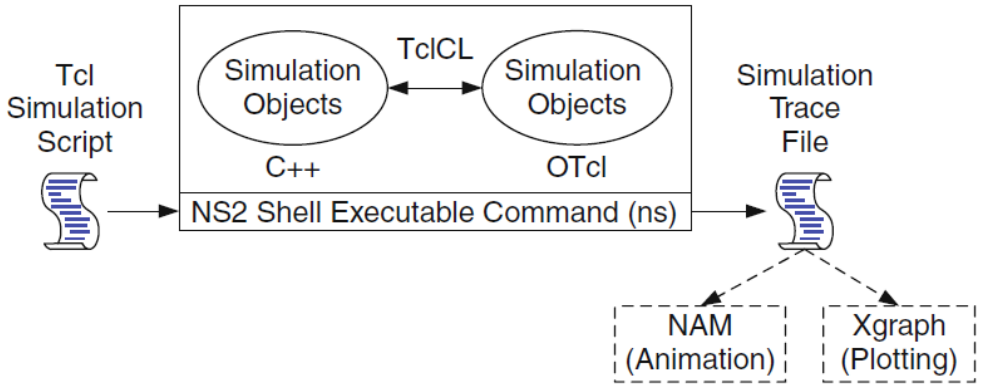
funciona en varios sistemas operativos como Linux, OS X, Solaris, Windows y es el más útil para simular un escenario para MANET's de forma muy simple (Figura 24).

Figura 23 Arquitectura de NET2PLAN



Fuente: (Pavón Mariño & Izquierdo Zaragoz, 2011)

Figura 24 Arquitectura NS2



Fuente: (ns-users@isi.edu, s.f.)

Tiene una librería OTcl que se debe agregar después de la instalación para compilar redes ópticas la cual presenta inconvenientes en la instalación.

4.1.3 NCTUNS

El software NCTUns es un simulador de red extensible y emulador de redes de teleinformática. NCTUns utiliza la pila de protocolos TCP / IP y Linux para generar resultados de la simulación de alta fidelidad. La simulación usa un núcleo con una pila de protocolos de la vida real soportados en kernel de UNIX que se utilizan para generar resultados de la simulación de alta fidelidad. En NCTUns, la configuración y operación de una red simulada son exactamente iguales que los de una red IP de la vida real.

NCTUns simula redes IP basadas en Ethernet con nodos fijos y enlaces punto a punto. Simula IEEE 802.11 (a) (b), redes LAN inalámbricas, incluyendo tanto los modos de infraestructura y ad-hoc. Simula redes celulares GPRS. Simula redes ópticas, incluyendo la conmutación de circuitos de redes ópticas y redes más avanzadas de conmutación de ráfaga óptica (OBS) y muchos más.

NCTUns también simula varios protocolos tales como IEEE 802.3 CSMA / CD MAC, IEEE 802.11 (a) (b) (e) (p) CSMA / CA MAC, el protocolo de puente de aprendizaje utilizado por los interruptores, el protocolo de árbol de expansión utilizados por interruptores, IP, Mobile IP, RIP, OSPF, UDP, TCP, HTTP, FTP, Telnet, etc. simula el conjunto de protocolos de QoS DiffServ, el protocolo de configuración trayectoria de la luz óptica, el / RTCP / SDP conjunto de protocolos RTP. Simula el IEEE 802.16 (d) (e) (j) de protocolos WiMAX PMP y del protocolo 802.16 (d) el modo de malla, y DVBRCST.

4.2 MODELO DE ENLACE SIMULADO

A continuación se relacionan los detalles de topologías para los nodos en NET2PLAN. En la Tabla 3 se detalla las características principales de las tres topologías donde se simularan el algoritmo.

Se deben seleccionar los parámetros de entrada de cada topología y de acuerdo con estos valores la ruta del camino de óptico se basa en un costo mínimo de enrutamiento con la

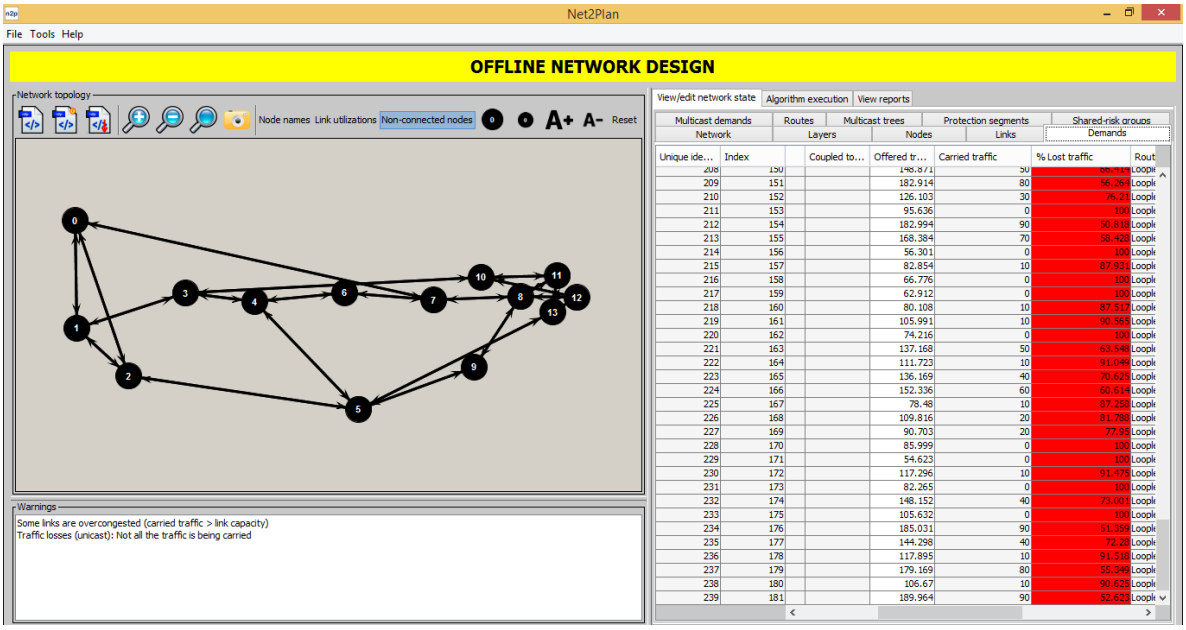
selección de la longitud de onda de primer ajuste más corta sobre un conjunto de rutas definidas por los costos (K). Para hacer cumplir SRG-disjointness, los costos de la fibra en cálculo de rutas de camino óptico se obtiene al iterar sobre todos los grupos autónomos y añadiendo a cada fibra asociada una penalización de peso proporcional al número de caminos ópticos previstos entre el mismo par de nodos que atraviesa dicha fibra.

Tabla 3 Información de Capa OTN

	Atlanta Network	NSFNet	EON
No Nodos	15	14	18
No Enlaces	44	42	66
No Demandas	210	182	306
No Demandas Multicast	15	14	18
No Rutas	224	486	306
No Multicast Tree	15	14	18
No Segmentos con Protección	224	486	306

Fuente: creación propia

Figura 25 Offline network desing



Fuente: Aplicación Net2Plan

Al definir la topología y los parámetros de entrada se agregan en el simulador en la opción de “OFFLINE NETWORK DESING” (Figura 25). En Offline se siguen los siguientes pasos de simulación:

1. Se agrega la topología que incluye enlaces y nodos con ROADM y WXC.
2. Se agrega las demandas de Tráfico para cada nodo.
3. Se agrega el algoritmo de JAVA a usar en la topología (EEM)
4. Se ajustan los parámetros de entrada.
5. Se ejecuta el Simulador para generar los reportes creados en Java

4.2.1 NSFNET

Tabla 4 Nodos

Atlanta		NSFNet		EON	
ID	Nombre	ID	Nombre	ID	Nombre
2	N1	2	Seattle (WA)	2	Vienna
3	N2	3	Palo Alto (CA)	3	Brussels
4	N3	4	San Diego (CA)	4	Copenhagen
5	N4	5	Salt Lake City (UT)	5	Paris
6	N5	6	Boulder (CO)	6	Berlin
7	N6	7	Houston (TX)	7	Athens
8	N7	8	Lincoln (NE)	8	Dublin
9	N8	9	Urbana-Champaign (IL)	9	Roma
10	N9	10	Pittsburgh (PA)	10	Luxemburg
11	N10	11	Atlanta (GA)	11	Amsterdam
12	N11	12	Ann Arbor (MI)	12	Oslo

13	N12	13	Ithaca (NY)	13	Lisbon
14	N13	14	Princeton (NJ)	14	Madrid
15	N14	15	College Park (MD)	15	Stockholm
16	N15			16	Zurich
				17	London
				18	Zagreb
				19	Prague

Fuente: creación propia

En la Tabla 3 se relacionan la métricas para la configuración de la simulación para la topología NSFNET (Tabla 2) para el software NET2PLAN, se observa que por enlace se tiene una configuración de 80 lambdas y la protección al 100% del tráfico de los servicios a modo de camino más corto con protección tipo 1+1. La información adicional es el tráfico ofrecido a la red a modo de estabilidad (sin perdidas en la red).

Tabla 5 Parámetros de Enlaces NSFNET

Métrica	Valor
Number of nodes	14
Number of links	42
Node out-degree (max, min, avg)	4, 2, 3.000
All links are bidirectional (yes/no)	Yes
Layer diameter (hops, km, ms)	3, 4500.000, 22.5
Capacity installed: total	3.360.000
Capacity installed: average per link	80.000
Capacity installed (limited capacity links): total	3.360.000
Capacity installed (limited capacity links): average per link	80.000
Number of UNICAST demands	182
Offered UNICAST traffic: total	4.992.997
Offered UNICAST traffic: average per node pair	27.434
Blocked UNICAST traffic (%)	0.000
Symmetric offered UNICAST traffic?	No
Number of MULTICAST demands	14
Offered MULTICAST traffic: total	420.000
Blocked MULTICAST traffic (%)	0.000

Number of routes	184
Unicast routing is bifurcated?	Yes
Network congestion - bottleneck utilization (w. reserved bw, w.o. reserved bw)	2.538, 4.413
Average (unicast) route length (hops, km, ms)	2.322, 2174.126, 10.9
Unicast routing has loops?	No
Number of multicast tres	14
Multicast routing is bifurcated?	No
Average multicast tree size (hops, km)	8.143, 9864.286
Number of protection segments in this layer	184
Average link capacity reserved for protection (absolute, %)	3.810, 20.863
% of carried traffic unprotected	0.000
% of carried traffic complete and dedicated protection	0.000
% of carried traffic partial and/or shared protection	100.000
Number of SRGs in the network	2
SRG definition characteristic	Mixed
% routes protected with SRG disjoint segments (w. end nodes, w.o. end nodes)	100.000, 100.000

Fuente: Creación propia

A nivel de parámetros de entrada del algoritmo se le asignan la cantidad de lambdas por enlace, las capacidades de las subportadoras y el número máximo de rutas admitidas por nodo como se observa en la Tabla 6.

Tabla 6 Parámetros de entrada al Algoritmo en NSFNET

Parámetro	Valor	Descripción
K	5	El número máximo de rutas admitidas por los nodos de entrada-salida
maxPropagationDelayMs	-1.0	Tiempo máximo permitido de propagación de un camino óptico en milisegundos
networkRecoveryType	1+1-srg-disjoint-lps	significa que cada camino de luz es 1 + 1 protegido por un SRG-disjuntos, que utiliza el mismo transpondedor
numWavelengthsPerFiber	80	Numero de longitudes de onda por enlace

transponderTypesInfo	12.5 1 1 9600 1 ; 25 1 1 9600 1 ; 50 1 1 9600 1	Tipo de transpondedor Separado por ";" I) Velocidad de Línea en Gbps, II) Costo del Transponder, III) No de Slots ocupados por cada fibra, IV) alcance óptico en km, V) Costo de regenerador óptico.
wdmLayerIndex	0	Índice de la capa WDM

Fuente: Creación propia

4.2.2 ATLANTA NETWORK

En la Tabla 7 se relacionan las métricas para la configuración de la simulación para la topología ATLANTA NETWORK (Tabla 4) para el software NET2PLAN, se observa que por enlace se tiene una configuración de 80 lambdas y la protección al 100% del tráfico de los servicios a modo de camino más corto con protección tipo 1+1. La información adicional es el tráfico ofrecido a la red a modo de estabilidad (sin perdidas en la red).

Tabla 7 Parámetros de Enlaces ATLANTA NETWORK

Métrica	Valor
Number of nodes	15
Number of links	44
Node out-degree (max, min, avg)	4, 2, 2.933
All links are bidirectional (yes/no)	Yes
Layer diameter (hops, km, ms)	5, 6000.000, 30.0
Capacity installed: total	3.520.000
Capacity installed: average per link	80.000
Capacity installed (limited capacity links): total	3.520.000
Capacity installed (limited capacity links): average per link	80.000
Number of UNICAST demands	210
Offered UNICAST traffic: total	546.904
Offered UNICAST traffic: average per node pair	2.604
Blocked UNICAST traffic (%)	0.000
Symmetric offered UNICAST traffic?	No
Number of MULTICAST demands	15
Offered MULTICAST traffic: total	300.000
Blocked MULTICAST traffic (%)	0.000
Number of routes	210
Unicast routing is bifurcated?	No

Network congestion - bottleneck utilization (w. reserved bw, w.o. reserved bw)	3.500, 4.118
Average (unicast) route length (hops, km, ms)	2.475, 3009.728, 15.0
Unicast routing has loops?	No
Number of multicast tres	15
Multicast routing is bifurcated?	No
Average multicast tree size (hops, km)	14.000, 17593.047
Number of protection segments in this layer	210
Average link capacity reserved for protection (absolute, %)	3.552, 21.193
% of carried traffic unprotected	0.000
% of carried traffic complete and dedicated protection	0.000
% of carried traffic partial and/or shared protection	100.000
Number of SRGs in the network	0
SRG definition characteristic	None
% routes protected with SRG disjoint segments (w. end nodes, w.o. end nodes)	0.000, 0.000

Fuente: Creación propia

A nivel de parámetros de entrada del algoritmo se le asignan la cantidad de lambdas por enlace, las capacidades de las subportadoras y el número máximo de rutas admitidas por nodo como se observa en la Tabla 6.

4.2.3 EON

En la Tabla 8 se relacionan las métricas para la configuración de la simulación para la topología EON (Tabla 4) para el software NET2PLAN, se observa que por enlace se tiene una configuración de 80 lambdas y la protección al 100% del tráfico de los servicios a modo de camino más corto con protección tipo 1+1. La información adicional es el tráfico ofrecido a la red a modo de estabilidad (sin perdidas en la red).

Tabla 8 Parámetros de Enlaces EON

Métrica	Valor
Number of nodes	18
Number of links	66
Node out-degree (max, min, avg)	7, 2, 3.667
All links are bidirectional (yes/no)	Yes
Layer diameter (hops, km, ms)	4, 3837.000, 19.2

Capacity installed: total	5.280.000
Capacity installed: average per link	80.000
Capacity installed (limited capacity links): total	5.280.000
Capacity installed (limited capacity links): average per link	80.000
Number of UNICAST demands	306
Offered UNICAST traffic: total	1.460.000
Offered UNICAST traffic: average per node pair	4.771
Blocked UNICAST traffic (%)	0.000
Symmetric offered UNICAST traffic?	Yes
Number of MULTICAST demands	18
Offered MULTICAST traffic: total	90.000
Blocked MULTICAST traffic (%)	0.000
Number of routes	306
Unicast routing is bifurcated?	No
Network congestion - bottleneck utilization (w. reserved bw, w.o. reserved bw)	0.350, 0.700
Average (unicast) route length (hops, km, ms)	2.527, 1490.966, 7.45
Unicast routing has loops?	No
Number of multicast tres	18
Multicast routing is bifurcated?	No
Average multicast tree size (hops, km)	11.500, 7044.100
Number of protection segments in this layer	306
Average link capacity reserved for protection (absolute, %)	3.431, 19.886
% of carried traffic unprotected	0.000
% of carried traffic complete and dedicated protection	0.000
% of carried traffic partial and/or shared protection	100.000
Number of SRGs in the network	0
SRG definition characteristic	None
% routes protected with SRG disjoint segments (w. end nodes, w.o. end nodes)	0.000, 0.000

Fuente: Creación propia

A nivel de parámetros de entrada del algoritmo se le asignan la cantidad de lambdas por enlace, las capacidades de las subportadoras y el número máximo de rutas admitidas por nodo como se observa en la Tabla 6.

4.3 ENTORNOS DE SIMULACION

Mediante la simulación se observa la evolución del llenado de los enlaces a medida que se establecen “caminos ópticos”. Para las librerías de algoritmo “Shortest-Path”, “firstfit”. Realizando protección a cada una de las demandas sobre las topologías, el entorno de simulación en el que se han desarrollado las pruebas de ejecución del algoritmo EEM (DRWA) implementado consiste en la ejecución de los mismos parámetros mencionados en el ítem anterior y realizar las siguientes operaciones.

El plano de control ejecutado por el Algoritmo EEM ha sido probado en una simulación de las topologías de Malla fotónica. Para estas simulaciones se han instalado entidad de nodo ROADM con tecnología SLICE simulando en cada una de las 14, 15, 60 nodos bidireccionales empleados para dicho propósito. Cada uno de estos nodos realiza las operaciones propias de un nodo.

- Actúa como cliente emitiendo las peticiones de ruta que tengan como origen al propio nodo. Emite una solicitud hacia la base de datos de la OXC que tiene toda la información de la red. El controlador del OXC devuelve la ruta y la asignación de recursos espectrales en una respuesta.
- Al recibir la respuesta, el nodo se encarga de enviar los mensajes del algoritmo EEM para realizar la reserva de recursos en la red mediante firstfit.
- Si la ruta ha sido establecida correctamente, el nodo recibirá el mensaje de respuesta de todos los nodos de la red para señalizar que la ruta ha sido establecida correctamente.
- Gestiona la ocupación de los enlaces adyacentes al nodo. Mantiene una mini matriz de base de datos que incluye la información de la parte de la topología conectada al nodo (enlaces adyacentes al nodo). Si la ruta enviada por Shortest-Path indica reservar recursos que ya están ocupados, enviara un mensaje al resto de la red indicando que dichos recursos ya están ocupados. Dicho mensaje actualiza la base de datos de todos los nodos OXC.
- Los nodos simulados pueden procesar peticiones de rutas OTN Flexgrid, gracias a que han sido implementadas las librerías para elegir el ancho de banda que ocupa un canal de forma flexible en base al algoritmo EEM.

A nivel de espectro se emplea una red OTN Flexible mediante SLICE con granularidad de tráfico y con portadoras FSU con valores de 12,5 GHz, 25GHz y 50 GHz. El tráfico es protegido a nivel de OTN 1+1 duplicando el tráfico, de una demanda desde un origen a un destino. Esta protección es a nivel de nodo y ambas rutas son completamente disjuntas, es decir, no comparten ningún enlace ni ningún nodo. Esta protección es del 100% del tráfico.

En la Tabla 4-8 se describe el proceso de las simulaciones realizadas para las topologías.

Tabla 9 Simulaciones para las Topologías

	SIMULACIONES				
Parámetro	**Primera**	**Segunda**	**Tercera**	**Cuarta**	**Quinta**
K	5	5	5	5	5
Numero de longitudes de onda por fibra	80	80	80	80	80
Escala de Trafico	x2	x2	x2	x2	x2

Fuente: Creación propia

En cada una de las simulaciones se obtienen diferentes resultados para las métricas de Probabilidad de Bloqueo, Utilización de canal, Caminos Ópticos, Retraso y resistencia de red que se analizaran en el siguiente capítulo. En los Anexos B, C, D se encuentran los cálculos físicos de cada una de las topologías.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

Las pruebas se realizaron en demandas sobre Carrier de 12.5, 25, 50 Gbps, el principal impacto se refleja en las restricciones de la capa física como la dispersión cromática. En los anexos se observa el impacto de XPM en calidad de la señal, ya que este es un efecto fuertemente influenciado por la dispersión cromática.

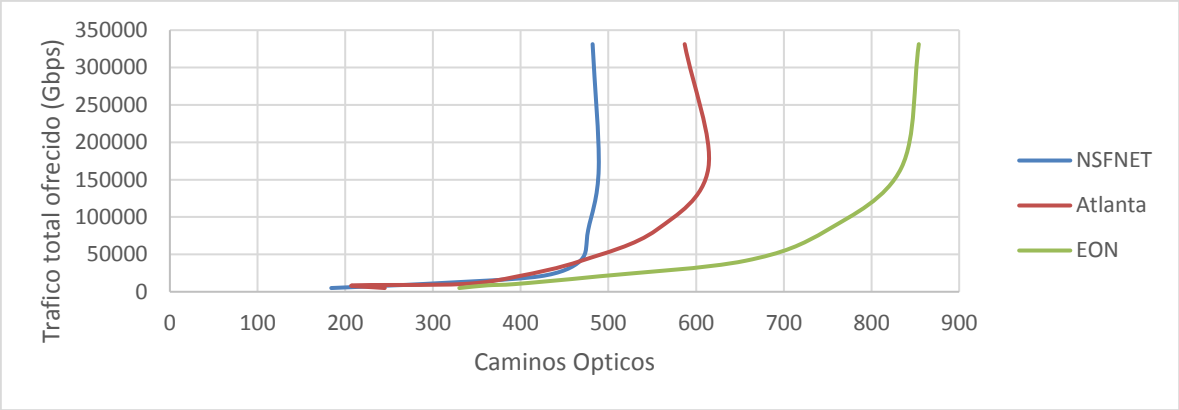
En la Figura 26 se observa que al incrementar el tráfico ofrecido al doble en las tres topologías, la cantidad de caminos ópticos aumentan entre 10% - 20 %, teniendo menor probabilidad de bloqueo en capacidad de tráfico ofrecido superior a 10 Tbps. Con el algoritmo heurístico EEM propuesto y la topología de RED OTN con el segundo Path como protección se logra manejar altos flujos de tráfico unicast y multicast (Figura 27) mejorando el rendimiento de la red un 60 % y a nivel de resistencia (todo el tráfico está protegido) el 100%.

En el modelo de bloqueo, las solicitudes de conexión siguen un proceso de Poisson con una tasa promedio de λ y el tiempo de mantenimiento después de la distribución exponencial negativa con un tiempo medio igual a una unidad de tiempo. Tiempos entre llegadas (1 / lambda) son los mismos para todas las velocidades de línea dentro de cada par de nodos origen y destino, y este valor se ajusta de manera que el promedio cantidad de tráfico ofrecido coincide con los valores dados por la matriz de tráfico de entrada de simulación de tráfico M.

La matriz asociada a una carga del 100% se obtiene calculando la versión máxima de la cola matriz que tiene el camino más corto posible (en número de saltos o distancia en Km) de enrutamiento a través de la red, utilizando la modulación de espectro más eficiente disponible en cada ruta. Diferentes factores de carga se probaron en cada topología que van desde la situación de bloqueo de bajo tráfico donde es insignificante a una situación de alto tráfico, donde el bloqueo es inaceptable. Nuestra métrica de interés es la probabilidad de bloqueo (BP) en ancho de banda, que se calcula con la suma de las probabilidades de bloqueo por cada camino de luz observado de cada tipo de línea de 12.5; 25; 50; 75 Gbps, ponderado por su tasa; es decir, la relación de la cantidad total de Gbps bloqueado con

respecto a la cantidad total de Gbps ofrecido a la red como se observa en la Figura 27. En cada prueba, las solicitudes de conexión se generaron para un número máximo de 860 caminos ópticos con un promedio de Delay en la red de 9.69e+03.

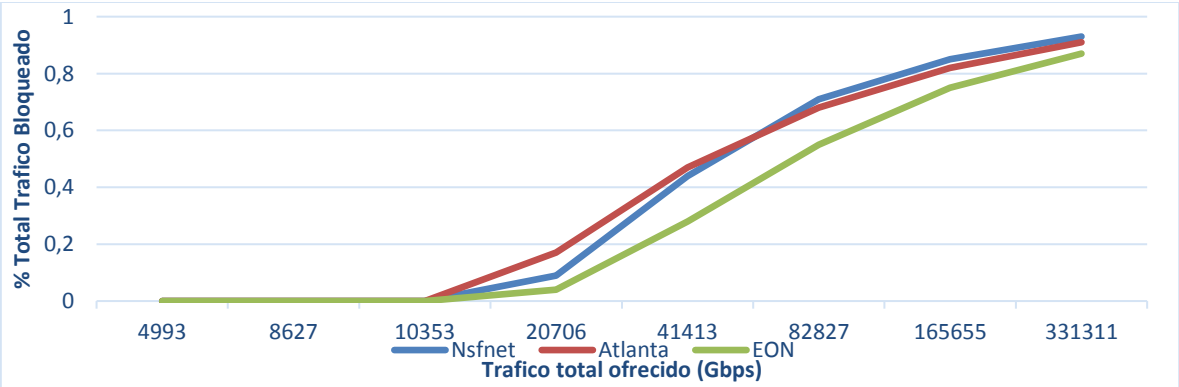
Figura 26 Tráfico Total Ofrecido (Gbps) vs Caminos Ópticos



Fuente: Creación propia

Al aumentar el número máximo de rutas admitidas en un instante por un par de nodos de entrada-salida k, la probabilidad de bloqueo permanece estable (debido a la modulación utilizada) y la cantidad de lambdas para realizar enrutamiento, en este caso se asume la cantidad de lambdas en 80 debido a los desarrollos actuales de OTN sobre DWDM de los proveedores de equipos Huawei, Alcatel, Ciena y ZTE.

Figura 27 Tráfico Total Ofrecido (Gbps) vs Probabilidad de Bloqueo



Fuente: Creación propia

Los resultados muestran que efectivamente al final del estudio la demanda es la misma para los tres casos de estudio. También se puede observar, el mismo número de conexiones en los dos primeros casos.

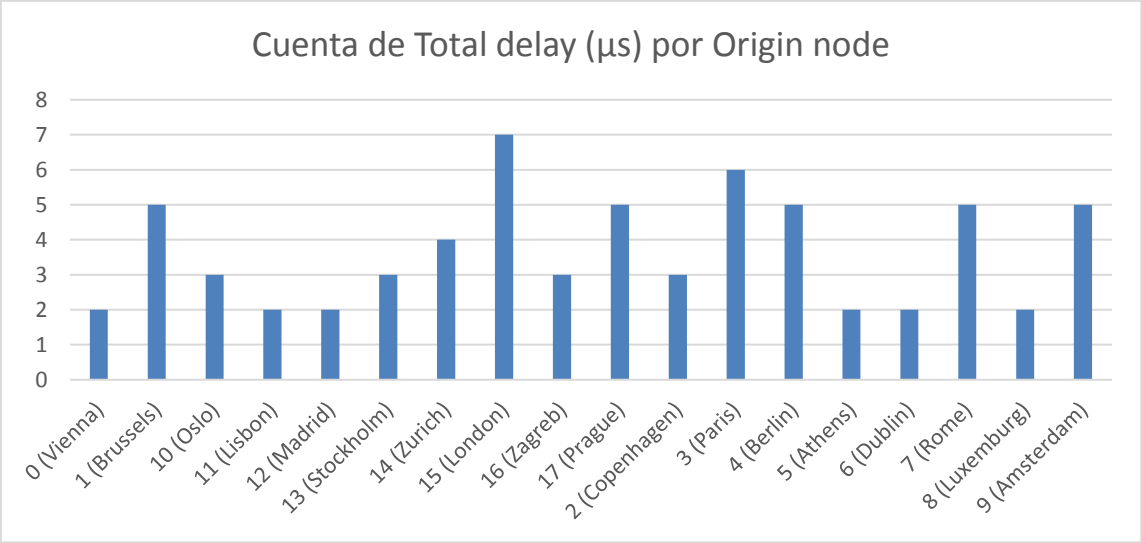
Se puede observar que en la Topología EON al tener más nodos ROADM y enlaces maneja mayor tráfico sin presentar probabilidad de Bloqueo (Trafico Ofrecido =20 Tbps – BP=0,04). Al diseñar una topología con MESH, el manejo de tráfico con el Algoritmo EEM aumentara con respecto a EON manteniendo una probabilidad de bloqueo inferior al 2%, este tipo de soluciones son costosas por el despliegue de fibra para lograrla.

Dado que es muy común que las fuentes de tráfico tengan picos varias veces superiores a su promedio (por ejemplo 2 o 3 veces). Sin embargo, hay momentos en el tiempo, intervalos de máximo tráfico coinciden y capacidades de los enlaces no son suficientes para reenviar el tráfico. Los nodos almacenan paquetes en las colas, por lo que se retrasan hasta que puedan ser transmitidos (este retardo se conoce como cola de retardo). Si esta situación se mantiene, las colas se llenan provocando descarte de paquetes, se dice que el enlace está congestionado o saturado. Si la capacidad del enlace es inferior a la suma del tráfico medio generado por las fuentes de desplazamiento, siempre se producirá una gran cantidad de descartes de paquetes. Los diseños de red deben cumplir la condición que las capacidades de los enlaces no deben estar por debajo de la suma de los promedios de los tráficos a realizar.

Con nuestro algoritmo EEM se intenta modelar estadísticamente retrasos y el descarte de paquetes con el fin de minimizar sus efectos. Los modelos de tráfico capturar no sólo el promedio de cada fuente de tráfico, como también una medida de su explosividad. Es evidente que cuanto más largo sean los intervalos de pico mayor será el retardo de espera en cola. Esto se debe a que durante los intervalos de baja carga, los enlaces están inutilizados con retrasos insignificantes, pero durante los intervalos de máximo tráfico los paquetes necesitan ser amortiguados y puede sufrir grandes demoras de espera o descartes. Naturalmente, un retardo cero de cola se produce cuando el tráfico es perfectamente constante (no al azar).

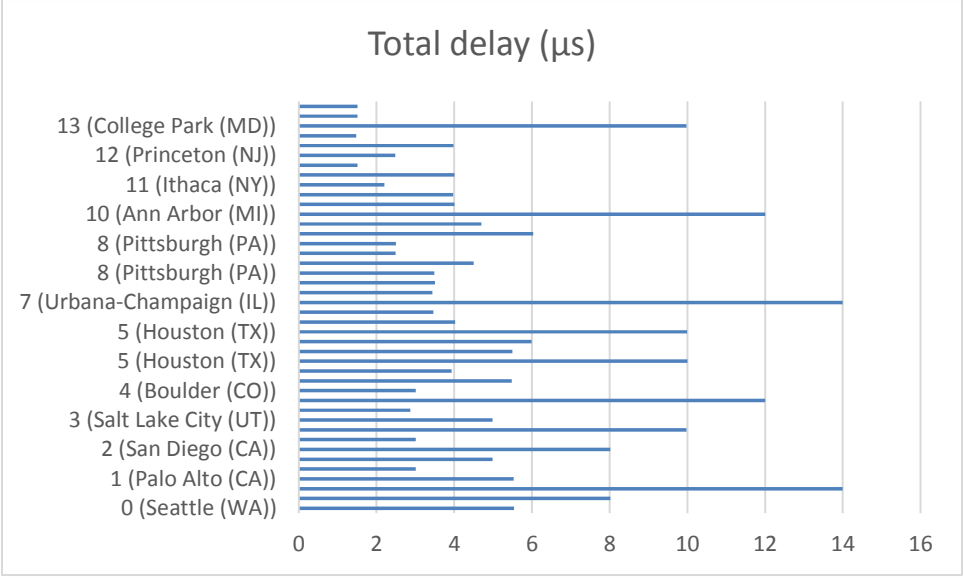
En las Figuras 28, 29, 30 se observan los Delays para las tres topologías con un tráfico ofrecido a la red de 10 Tbps con probabilidad de bloqueo de 0%, los tiempos de retraso son muy bajos (por debajo de los 12 µs) para las topologías soportando un tráfico tan alto.

Figura 28 Delay Total por enlace en Topología EON



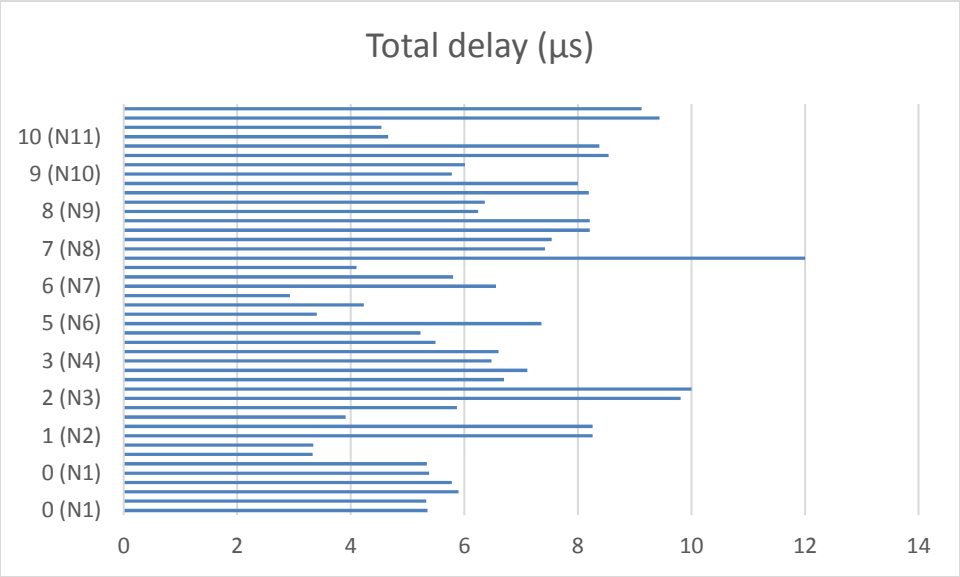
Fuente: Creación propia

Figura 29 Delay Total por enlace en Topología NSFNET



Fuente: Creación propia

Figura 30 Delay Total por enlace en Topología Atlanta Network



Fuente: Creación propia

Se observa un gran diferencia comparándolo con estudio realizado en (Izquierdo Zaragoza, Pedreno Manresa, & Pavon Marino, 2015) donde el encaminamiento se realiza desde IP, tanto el trafico transportado como la cantidad de longitudes de onda utilizadas son menores y por lo tanto la probabilidad de bloqueo es mayor. El tráfico soportado por el algoritmo EEM es doble del tráfico de la referencia anterior ya que el tráfico ofrecido máximo es de 4000Gbps con un máximo de 350 caminos ópticos. Esto nos demuestra la robustez de las redes ópticas transparentes.

En (Pavon-Marino, Azodolmolky, Aparicio-Pardo, Garcia-Manrubia, & Pointurier, JUNE 15, 2009) trabajan varios algoritmos pero el principal es el algoritmo exploración global que supera todos los esquemas secuenciales probados en topologías más grandes. Por otra parte, la complejidad temporal del algoritmo de búsqueda global es baja. En esta referencia realizan las simulaciones con máximo 32 longitudes de onda mientras en nuestro diseño se trabaja con 80 lambdas. La oferta de tráfico donde se comienzan a ver bloqueos es sobre un Thera mientras en nuestro diseño se manejan 10 Theras antes del bloqueo.

6. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Para lograr aplicar Calidad de servicio en redes ópticas es necesario el estudio del problema clásico de encaminamiento óptico RWA, que considera un desarrollo favorable de los caminos ópticos establecidos, así como las estrategias para R y WA.

El encaminamiento DR tiene un alto impacto sobre la probabilidad de bloqueo comparado con la asignación de longitudes de onda WA, disponiendo de fibras de 80 canales o mayores dependiendo de la técnica de modulación. Por lo tanto al aplicar DR a una topología se reflejan mejores resultados a nivel de ingeniería de tráfico.

La función de costo del algoritmo de encaminamiento R se adapta a la topología de red y características de transmisión concretas de las topologías. Las estrategias adaptativas posibilitan la inclusión de criterios de carga de los enlaces en la función de los costos (No Saltos, Distancia en KM, Delay, etc). Esto es muy conveniente ya que se evita la congestión de los enlaces y a consecuencia se disminuye la probabilidad de bloqueo.

En cuanto a la primera petición rechazada se obtienen mejoras con respecto a funciones de costo fijo, que pueden oscilar entre un 20% y un 80%, dependiendo de la topología, mediante el empleo de una función de costo adaptativa que ejecute equilibrio de cargas.

Por otro lado, se consiguen mejores prestaciones al aumentar el número de enlaces o longitudes de onda en el algoritmo “Shortest-Path”. Por ejemplo, para (“λ”) igual a 80 se obtienen altos flujos de tráfico antes del primer bloqueo.

Los efectos de la capa física disminuyen la calidad de señal transmitida condicionando en algunos casos una adecuada recepción de la señal. En la ITU-T G.680 se expone formulación de efectos físicos relevantes.

La protección (1+1) mediante caminos disjuntos (que no comparten enlaces entre los caminos denominados principal y de protección) tiene un impacto negativo sobre la

capacidad para procesar peticiones de la red. Es conveniente su uso para caminos ópticos específicos, pero no para el procesamiento de todas las peticiones.

La tecnología OTN permitió una gran flexibilidad en cuanto a señalización, monitorización y restauración de red y parece lógico que la evolución lógica de las redes sea la de transmitir paquetes IP directamente sobre WDM.

Para la topología NSFNET, sin protección, el llenado del enlace más cargado se produce en torno a la petición 450; bajando hasta la petición 250 cuando hay protección (1+1). En paralelo, también el primer bloqueo de petición sufre un adelanto al pasar de la petición 493 a la 195; es decir, hay un empeoramiento del orden del 60%.

Por último, la principal dificultad para la conmutación y envío directo de FSU en redes completamente-ópticas es la ausencia de memorias ópticas similares a las electrónicas, y que son de vital importancia a efectos de solucionar la colisión dentro del nodo. En la actualidad se dispone de una multitud de elementos opto-electrónicos que permiten realizar múltiples funciones en el dominio óptico pero todavía falta una herramienta de almacenamiento completamente óptico que permita guardar y liberar temporalmente.

Con la implementación de esta Metodología sobre una Red óptica con las recomendaciones de la capa física se logra acercar al modelo de dos capas IP / WDM con anchos de banda variables logrando optimizar el espectro y los caminos ópticos. Se recomienda revisar los estudios ya iniciados sobre la búsqueda de alternativas para dotar de mayor eficiencia a redes OTN con elevado ancho de banda.

TRABAJOS FUTUROS

1. Diseño de una estrategia PCE que resuelva de manera conjunta las estrategias de encaminamiento y asignación de longitud de onda con el objetivo de mejorar la disponibilidad de las redes ópticas.
2. Resolución del problema de encaminamiento mediante algoritmia genética.
3. Consideración del concepto de grupos de riesgo de enlace SRLG, en la estrategia de encaminamiento de la ruta principal y de protección.

APORTES DE LA INVESTIGACION

- Se realizó una Metodología que presenta una nueva visión en la implementación de ingeniería de tráfico en redes OTN. Analizando las métricas que afectan directamente las redes ópticas.
- Se relacionan los elementos físicos necesarios para realizar encaminamiento dinámico en redes OTN, con el incremento del tráfico de datos se requiere de tecnologías completamente ópticas que sean capaces de conmutar a nivel de longitud de onda.
- Se presenta el algoritmo EEM que al ser configurado sobre cada uno de los OXC optimiza el ancho de banda de la red y reduce la probabilidad de Bloqueo.
- Se presenta OFDM como técnica de modulación en OTN para lograr longitudes de onda de diferentes anchos de banda. Se considera la conmutación de ráfagas como un paso de evolución intermedio entre la conmutación de circuitos ópticos y la conmutación de paquetes ópticos.

7. REFERENCIAS

A., B. (2003). Multicast traffic grooming in wdm optical mesh networks. *Global Telecommunications conference*.

al, Z. e. (August 2012). “A Survey on OFDM-Based elastic core optical networking. *IEEE*.

Álvarez Moraga, S. A., & González Valenzuela, A. J. (2005). ESTUDIO Y CONFIGURACIÓN DE CALIDAD DE SERVICIO PARA PROTOCOLOS IPV4 E IPV6 EN UNA RED DE FIBRA ÓPTICA WDM. *Univ. Tarapacá*.

Banerjee, A., Drakes, J., & Lang, B. Turner, K. K, J. (2001). Generalized multiprotocol label switching: an overview of routing and management enhancements. *IEEE Commun*.

BERGER , L. (2003). Generalized multi-protocol label switching signaling resource reservation protocol-traffic engineering (RSVP-TE) Extensions. *RFC3473*.

BERGER, L. (2003). Generalized multi-protocol label switching (GMPLS) signaling functional description. *RFC3471*.

Bhide, N. M., Sivalingam, K. M., & Fabry-Asztalos, T. (2001). *Routing Mechanisms Employing Adaptive Weight Functions for Shortest Path Rounting in Optical WDM Networks vol. 3, no. 3, pp. 227-236.* Photonic Network Communications.

Bijoy, C., & Sarmaa Partha, N. (2013). A QoS-aware wavelength assignment scheme for optical networks.

Blake, S., & et , a. (1998). An Architecture for Differentiated Services. *RFC2475*.

Bonaventura , G., Jones , G., & Trowbridge. (2008). Optical Transport Network Evolution: Hot Standardization Topics in ITU-T Including Standards Coordination AspectS. *IEEE Communications Magazine*.

C, D. F. (2011). Retos en la transmisión de 40/100Gb/s sobre fibra óptic. *Revista en Telecomunicaciones e Informatica*.

Center, I. 2. (25 de June de 2014). *http://noc.net.internet2.edu/*. Obtenido de http://noc.net.internet2.edu/

Chen, T., & T. H. , O. (1999). Reliable Services in MPLS. *IEEE Communications Magazine*, 58-62.

CORONET, D. (s.f.). *http://monarchna.com/topology.html*. Obtenido de http://monarchna.com/topology.html

D, C. (2002). Evolution of optical transport technologies: from SONET/SDH to WDM . *Communication Magazine*, Vol. 38, pp. 164-172.

Díaz Laurencio, E., Reinier , M., Marely del Rosario , C., & Puig Diaz, P. (2013). QoS en redes de área local. *Universidad de las Ciencias Informáticas*.

Dumka, A. (2015). Implementation of QoS Algorithm in Integrated. *Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), 2015 2nd International Conference on*.

Francoy, J. C. (2007). *Redes Opticas.* Mexico: limusa.

Golmie, N., Ndousse, T., & Su, D. (2000). A differentiated optical services model for WDM networks. *IEEE*.

H., Z., J.P., J., & B., M. (2000). A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Network. *Optical Networks Magazine*, Vol. 1, No. 1, pp. 47-60.

IETF. (October 2004.). Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture. *Technical Report RFC 3945, Internet Engineering Task Force (IETF)*.

ITU. (s.f.). Telecom Development Bureau. *Teletraffic Engineering Handbook*.

ITU-T. (2001). Interfaces for the Optical Transport Network (OTN). *ITU-T Recommendation G.709/Y.131*.

ITU-TG.694.1, R. (2012). Spectral grids for WDM applications: DWDM Frequency grid. *Recommendation ITU-TG.694.1*.

Izquierdo Zaragoza, J., Pedreno Manresa, J., & Pavon Marino, P. (2015). Maximizing IP Fast Rerouting Coverage in Survivable IP-over-WDM Networks. *IEEE*.

Jinno, M., Kozicki, B., Takara, H., Watanabe, A., & Sone, Y. (2010). Distance-Adaptive Spectrum Resource Allocation in Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network. *IEEE Communications Magazine*.

Jinno, M., Takara, H., Kozicki, B., & Tsukishima, Y. (2008). Demonstration of Novel Spectrum-Efficient Elastic Optical Path Network with Per-Channel Variable Capacity of 40 Gb/s to Over 400 Gb/s. *IEEE*.

Jinno, M., Takara, H., Kozicki, B., Tsukishima, Y., Sone, Y., & Matsuoka, S. (2009). Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network Architecture, Benefits, and Enabling Technologies. *IEEE Commun.*

K-J, L., & G-Xi , X. (May 2002). Blocking Analysis of Dynamic Lightpath Establishment in Wavelength-Routed Networks. *CC, New York,*.

Klinkowski, M., & Marciniak, M. (2001). QoS Guarantees in IP Optical Networks Using MPLWMPLambdaS. *IEEE*.

Kovacevic, M., & Acampora, A. (1996). *Benefits of Wavelength Translation in All-Optical Clear-Channel Networks vol. 14, no. 5, pp. 868-880.* IEEE Journal on Selected Areas in Communications.

Leiva, A., N. , P., Beghelli , A., & Olivares, R. (NOV. 2015). A Joint RSA Algorithm for Dynamic Flexible Optical Networking. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*.

M. , K., & A. , A. (1996). Benefits of Wavelength Translation in All-Optical Clear-Channel Networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications. vol. 14, no. 5, pp. 868-880.

M., J., H., T., B. , K., & Y. Tsukishima. (November 2009.). Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network:. *IEEE Commun*.

M.Jinno, B. H. (August 2010 0163). Distance-Adaptive Spectrum Resource Allocation in Spectrum-Sliced Elastic. *IEEE Communications Magazine*.

Ma Maode, H. X. (2004). Adaptive scheduling for integrated traffic on WDM Optical networks. *Computer Networks*, 773–88.

Miroslaw, K., & Careglio, D. (2011). A Routing and Spectrum Assignment Problem in Optical OFDM Networks. *European teletraffic seminar*.

Myungsik , Y., Chunming, Q., & Sudhir , D. (2001). Optical Burst Switching for Service Differentiation in the Next-Generation Optical Internet.

Narasimhamurthy, A., Banavar, M., & Tepedelenlioglu, C. (2010.). OFDM Systems for Wireless Communications. *Morgan & Claypool Publishers,*.

Nokia-Siemens. (2009). 40G today, 100G tomorrow high-speed transmission in DWDM networks. *Nokia-Siemens*.

ns-users@isi.edu. (s.f.). *The Network Simulator - ns-2*. Obtenido de The Network Simulator - ns-2: www.isi.edu/nsnam/ns/

Palmieri, F. (2005). GMPLS-based service differentiation for scalable QoS support in all optical Grid applications.

Patel, A., Ji, P., Jue, J., & T. , W. (2010). Routing, Wavelength Assignment, and Spectrum Allocation in Transparent Flexible Optical WDM (FWDM) Networks. *Photonics in Switching*, Paper PDPWG1.

Pavón Mariño , P., & Izquierdo Zaragoz, J. (2011). *net2plan*. Obtenido de http://www.net2plan.com/index.php

Pavon Mariño, P. (2016). *Optimization of computer networks - modeling and algorithms.* Wiley.

Pavon-Marino, P., Azodolmolky, S., Aparicio-Pardo, R., Garcia-Manrubia, B., & Pointurier, Y. (JUNE 15, 2009). Offline Impairment Aware RWA Algorithms for Cross-Layer Planning of Optical Networks. *IEEE*.

Puerto Leguizamón , G., Ortega , B., & Capmany. (2008). Data Networking evolution: Toward an all-optical communications platform. *Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia*.

R. C. , A., H. , K., & T. H, W. (2000). The evolution of optical systems: Optics everywhere. *Bell Labs Technical Journal*, Vol. 5, , pp. 185-20.

R. C., A., H. , K., & T. H. , W. (2000). The evolution of optical systems: Optics everywhere. *Bell Labs Technical Journal*, Vol. 5, , pp. 185-201.

Roese, J., Braun , R.-P., & Tomizawa , M. (2006). Optical Transport Network Evolving with 100 Gigabit Ethernet. *IEEE Communications Magazine*.

Roorda , P., & Collings , B. (2008). Evolution to Colorless and Directionless ROADMs. *JDSU*.

Shieh , W., & Djordjevic, I. (2010). OFDM for Optical Communications. *Academic Press, Elsevier*.

SILVA, Carlos Alberto Cadena . (2010). Control de tráfico en redes tcp/ip fundamentado en procedimientos y técnicas nicas de calidad de servicio a lo largo de una infraestructura de telecomunicaciones. *Sangolquí*.

Solano, F., Caro, L., & Fabregat, R. (JUNE 2007). G+: Enhanced Traffic Grooming in WDM Mesh Networks using Lighttours. *IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS*.

SuKyoung , L., Griffith, D., & Song, J.-S. (2002). Lambda GLSP setup with QoS requirements in optical Internet.

Truong, H.-L., Samborski, R., & Fahring, T. (2006). Towards a Framework for Monitoring and Analyzing QoS Metrics of Grid Services. *IEEE*.

Union, I. T. (February 2012). Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. *ITU-T Recommendation G.694.1*.

Weinsten, S., & Ebert, P. (October 1971). Data transmission by frequencydivision multiplexing using the discrete Fourier transform. *IEEE*.

Xiaohong , H., & MaodeMab. (2010). A heuristic adaptive QoS prediction scheme in single-hop passive star coupled WDM optical networks.

Y. , Z., X. , Z., Q., L., N., H., & Y., L. (2011). Traffic Grooming in Spectrum-Elastic Optical Path Networks. *Paper OTuI1*.

Yan A, G. A. (1996). A distributed adaptive protocol providing real-time services on WDM-based LANs. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 1245–54.

Yaohui, J., Wei, Z., Weiqiang , S., & Wei, G. (2010). On the Spectrum-Efficiency of Bandwidth-Variable Optical OFDM Transport Networks. *OSA / OFC/NFOEC*.

Zhang, F. (2011). Requirements for GMPLS Control of Flexible Grids. *IETF Draft*.

Zhang, F. (2011). Requirements for GMPLS Control of Flexible Grids. *IETF Draft*.

Zhang, G., Marc, D., Morea, A., & Mukherjee, B. (2013). A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking. *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*.

ZHANG, X., Xiaobo1, Y., LIU, X., & J. , P. (April 2013). 100G Transport Systems: Technology Bench-Mark Testing in China and Evolution to Terabit/s Interfaces. *China Communications*.

ANEXOS

ANEXO A: CODIGO JAVA ALGORITMO EEM

```
import java.util.ArrayList;

import java.util.Collection;

import java.util.HashMap;

import java.util.HashSet;

import java.util.LinkedList;

import java.util.List;

import java.util.Map;

import java.util.Set;


import com.net2plan.interfaces.networkDesign.Demand;

import com.net2plan.interfaces.networkDesign.IAlgorithm;

import com.net2plan.interfaces.networkDesign.Link;

import com.net2plan.interfaces.networkDesign.Net2PlanException;

import com.net2plan.interfaces.networkDesign.NetPlan;

import com.net2plan.interfaces.networkDesign.NetworkLayer;

import com.net2plan.interfaces.networkDesign.ProtectionSegment;

import com.net2plan.interfaces.networkDesign.Route;

import com.net2plan.interfaces.networkDesign.SharedRiskGroup;

import com.net2plan.libraries.WDMUtils;

import com.net2plan.utils.Constants.OrderingType;

import com.net2plan.utils.Constants.RoutingType;

import com.net2plan.utils.DoubleUtils;

import com.net2plan.utils.InputParameter;

import com.net2plan.utils.IntUtils;
```

```
import com.net2plan.utils.Pair;

import com.net2plan.utils.Triple;



import cern.colt.matrix.tdouble.DoubleFactory2D;

import cern.colt.matrix.tdouble.DoubleMatrix2D;




public class Heuristic_EEM implements IAlgorithm

{

	private int k = 5; // Numero maximo de caminos admitidos por un par de nodos para una conexion

	private InputParameter LongitudesdeOnda =  new InputParameter ("LongitudesdeOnda", (int) 40 , "Numero de Longitudes de Onda por fibra" , 1, Integer.MAX_VALUE);

	private InputParameter CapacidadTransponder = new InputParameter ("CapacidadTransponder", "10 1 1 9600 1; 10 1 1 9600 1;" , "(i) Velocidad de Linea en Gbps, (ii) costos del transponder, (iii) numero de Slots ocupados, (iv) Alcanzabilidad optica en km , (v) costo de la señal del regenerador no tiene conversion de longitus de onda.");

	private InputParameter Capawdm = new InputParameter ("Capawdm", (int) 0 , "Capa WDM");

	private String Proteccion = "1+1-canales-disjuntos";

	private double maxDelayMs =  -1; // "Delay No se asume valor siendo negativo");



	private NetPlan netPlan;

	private Map<Demand,List<List<Link>>> enlacesXdemandas; // Lista de enlaces para las demandas

	private Map<Demand,List<Pair<List<Link>,List<Link>>>> Proteccion_enlacesXdemandas; //lista de enlaces por demandas con protecciones.

	private NetworkLayer wdmLayer;

	private WDMUtils.TransponderTypesInfo tpInfo;

	private int Nodos, Enlaces, Demandas , Slots, Transponders;

	private boolean singleSRGToleranceNot11Type;

	private DoubleMatrix2D SlotXFrecuencia;



	@Override

	public String executeAlgorithm(NetPlan netPlan, Map<String, String> algorithmParameters, Map<String, String> net2planParameters)
```

```
{

        InputParameter.initializeAllInputParameterFieldsOfObject(this, algorithmParameters); //inicializa los parametros de entrada


        this.netPlan = netPlan;

        this.wdmLayer = Capawdm.getInt () == -1? netPlan.getNetworkLayerDefault() : netPlan.getNetworkLayer(Capawdm.getInt ()); //Carga la topologia


        this.Nodos = netPlan.getNumberOfNodes();

        this.Enlaces = netPlan.getNumberOfLinks(wdmLayer);

        this.Demandas = netPlan.getNumberOfDemands(wdmLayer);

        this.Slots = LongitudesdeOnda.getInt();


        if (Nodos == 0 || Enlaces == 0 || Demandas == 0) throw new Net2PlanException("El Algoritmo necesita una topologia con enlaces, Demandas y Nodos");


        this.tpInfo = new WDMUtils.TransponderTypesInfo(CapacidadTransponder.getString()); // Carga los transponders

        this.Transponders = tpInfo.getNumTypes(); //Cantidad de tipos de transponders

        netPlan.removeAllUnicastRoutingInformation(wdmLayer); //Se remueve el Routing para q el algortimo lo genere

        netPlan.setRoutingType(RoutingType.SOURCE_ROUTING , wdmLayer); //tipo de routing en wdmlayer

        //Computa la lista de posibles caminos candidatos

        this.SlotXFrecuencia = DoubleFactory2D.dense.make(Slots , Enlaces);


        this.enlacesXdemandas = netPlan.computeUnicastCandidatePathList(wdmLayer ,

                        netPlan.getVectorLinkLengthInKm(wdmLayer).toArray(), "K" , "" + k , "maxLengthInKm" , ""+tpInfo.getMaxOpticalReachKm(), "maxPropDelayInMs" , "" + maxDelayMs); // Calcula los k enlaces que cumplen cada demanda.

        this.Proteccion_enlacesXdemandas = NetPlan.computeUnicastCandidate11PathList(enlacesXdemandas,0);// Calcula la Proteccion de los paths de las demandas


        //Calcula el routing de las listas de caminos candidatos

        Map<Link,Double> linkLengthMap = new HashMap<Link,Double> (); for (Link e : netPlan.getLinks(wdmLayer)) linkLengthMap.put(e , e.getLengthInKm());
```

```
final int maximumNumberOfPaths = Transponders*k*Demandas;
List<Integer> transponderType_p = new ArrayList<Integer> (maximumNumberOfPaths);
List<Double> cost_p = new ArrayList<Double> (maximumNumberOfPaths);
List<Double> lineRate_p = new ArrayList<Double> (maximumNumberOfPaths);
List<Integer> numSlots_p = new ArrayList<Integer> (maximumNumberOfPaths);
List<List<Link>> seqLinks_p = new ArrayList<List<Link>> (maximumNumberOfPaths);
List<List<Link>> seqLinks2_p =  new ArrayList<List<Link>> (maximumNumberOfPaths);
List<int []> regPositions_p = new ArrayList<int []> (maximumNumberOfPaths);
List<int []> regPositions2_p = new ArrayList<int []> (maximumNumberOfPaths);
List<Demand> demand_p = new ArrayList<Demand> (maximumNumberOfPaths);
Map<Demand,List<Integer>> demand2PathListMap = new HashMap<Demand,List<Integer>> ();
for (Demand d : netPlan.getDemands(wdmLayer))
{
        boolean atLeastOnePathOrPathPair = false;
        List<Integer> pathListThisDemand = new LinkedList<Integer> ();
        demand2PathListMap.put(d , pathListThisDemand);

        for (int j = 0 ; j < Transponders ; j ++)
        {
                final boolean isRegenerable = tpInfo.isOpticalRegenerationPossible(j);
                for (Object sp : Proteccion_enlacesXdemandas != null? Proteccion_enlacesXdemandas.get(d) :
enlacesXdemandas.get(d))
                {
                        List<Link> firstPath = (Proteccion_enlacesXdemandas == null)? ((List<Link>) sp) :
((Pair<List<Link>,List<Link>>) sp).getFirst();
                        List<Link> secondPath = (Proteccion_enlacesXdemandas == null)? null :
((Pair<List<Link>,List<Link>>) sp).getSecond ();
                        final int [] regPositions1 = isRegenerable? WDMUtils.computeRegeneratorPositions(firstPath ,
tpInfo.getOpticalReachKm(j)) : new int [firstPath.size()];
                        final int [] regPositions2 = Proteccion_enlacesXdemandas == null? null : isRegenerable?
WDMUtils.computeRegeneratorPositions(secondPath , tpInfo.getOpticalReachKm(j)) : new int [secondPath.size()];
```

```
                                                final int numRegeneratorsNeeded = !isRegenerable? 0 : (int) IntUtils.sum(regPositions1) +
(secondPath == null? 0 : (int) IntUtils.sum(regPositions2)) ;

                                                final double costOfLightpathOr11Pair = tpInfo.getCost(j) * (Proteccion_enlacesXdemandas != null? 2
: 1) + (tpInfo.getRegeneratorCost(j)*numRegeneratorsNeeded );

                                                final int pathIndex = cost_p.size();

                                                cost_p.add (costOfLightpathOr11Pair);

                                                transponderType_p.add (j);

                                                lineRate_p.add(tpInfo.getLineRateGbps(j));

                                                numSlots_p.add(tpInfo.getNumSlots(j));

                                                demand_p.add(d);

                                                seqLinks_p.add(firstPath);

                                                pathListThisDemand.add(pathIndex);

                                                if (Proteccion_enlacesXdemandas != null) { seqLinks2_p.add(secondPath);
regPositions2_p.add(regPositions2); }

                                                atLeastOnePathOrPathPair = true;

                                        }

                                }

                                //Tome una demanda a la vez, en un bucle HLDA (ordenada por tráfico bloqueado promedio).

                                //* En cada demanda, tratar todos los posibles pares ruta-transpondedor, y tomar la mejor de acuerdo con la métrica de
rendimiento:

                                //* AvExtraTrafficCarried / transponderCost * /



                                boolean atLeastOneLpAdded = false;

                                Set<Integer> demandIndexesNotToTry = new HashSet<Integer> ();

                                double totalCost = 0;

                                do

                                {

                                        double [] b_d = getVectorDemandAverageAllStatesBlockedTraffic ();

                                        int [] demandIndexes = DoubleUtils.sortIndexes(b_d , OrderingType.DESCENDING);

                                        atLeastOneLpAdded = false;
```

```
for (int demandIndex : demandIndexes)
{
    final Demand d1 = netPlan.getDemand(demandIndex , wdmLayer);
    if (demandIndexesNotToTry.contains(demandIndex)) continue;
    if (isDemandFullySatisfied(d1)) { demandIndexesNotToTry.add(demandIndex); continue; }
    WDMUtils.RSA best_rsa = null;
    WDMUtils.RSA best_rsa2 = null;
    double best_performanceMetric = 0;
    int best_pathIndex = -1;
    for (int pathIndex : demand2PathListMap.get (d1))
    {
        List<Link> firstPath = seqLinks_p.get(pathIndex);
        List<Link> secondPath = Proteccion_enlacesXdemandas == null? null : seqLinks2_p.get(pathIndex);
        Pair<Integer,Integer> slotIds = null;
        int slotId = -1;
        if (Proteccion_enlacesXdemandas == null)
            slotId = WDMUtils.spectrumAssignment_firstFit(firstPath , SlotXFrecuencia , numSlots_p.get(pathIndex));
        else
            slotIds = WDMUtils.spectrumAssignment_firstFitTwoRoutes(firstPath, secondPath, SlotXFrecuencia , numSlots_p.get(pathIndex));
        if (Proteccion_enlacesXdemandas == null) if (slotId == -1) continue;
        if (Proteccion_enlacesXdemandas != null) if (slotIds == null) continue;

        final double extraCarriedTraffic = getAverageAllStatesExtraCarriedTrafficAfterPotentialAllocation (d1 , lineRate_p.get(pathIndex) , seqLinks_p.get(pathIndex));
        final double performanceIndicator = extraCarriedTraffic / cost_p.get(pathIndex);
        if (performanceIndicator > best_performanceMetric)
        {
```

```
                                                                    best_performanceMetric = performanceIndicator;

                                                                    best_rsa = new WDMUtils.RSA(firstPath ,
Proteccion_enlacesXdemandas != null? slotIds.getFirst() : slotId , numSlots_p.get(pathIndex) , regPositions_p.get(pathIndex));

                                                                    best_rsa2 = Proteccion_enlacesXdemandas == null? null : new
WDMUtils.RSA(secondPath , slotIds.getSecond() , numSlots_p.get(pathIndex) , regPositions2_p.get(pathIndex));

                                                                    best_pathIndex = pathIndex;

                                                                }

                                                            }

                                                            if (best_pathIndex == -1) { demandIndexesNotToTry.add(d1.getIndex()); continue; }

                                                            atLeastOneLpAdded = true;

                                                            totalCost += cost_p.get(best_pathIndex);

                                                            final Route lp = WDMUtils.addLightpath(d1 , best_rsa , lineRate_p.get(best_pathIndex));

                                                            WDMUtils.allocateResources(best_rsa , SlotXFrecuencia , null);

                                                            if (Proteccion_enlacesXdemandas != null)

                                                            {

                                                                final ProtectionSegment lpProt =
WDMUtils.addLightpathAsProtectionSegment(best_rsa2);

                                                                WDMUtils.allocateResources(best_rsa2 , SlotXFrecuencia , null);

                                                        lp.addProtectionSegment(lpProt);

                                                            }

                                                            break;

                                                        }

                                                    } while (atLeastOneLpAdded);

                                                }

                                                String outMessage = "Total cost: " + "\n "   ;

                                                System.out.println (outMessage);

                                                return "Ok! " + outMessage;

                                            }
```

ANEXO B: NSFNET WDM LINE ENGINEERING REPORT

This report checks the correctness of the line engineering design of the point-to-point WDM links in an optical network, following the guidelines described in ITU-T Manual 2009 "Optical fibres, cables and systems". The report assumes that the network links are WDM optical fibres with the following scheme:

A transmitter per WDM channel with the specifications given by "tp__XXX". The number of channels can vary from one to up to channels_maxNumChannels and, the design should be correct in all the cases. Transmitter specifications are set in "tp__XXX" input parameters

A multiplexer that receives the input power from the transmitters and with specifications given by "mux__XXX" parameters

A fiber link of a distance given by the link length, and with specifications given by "fiber__XXX" parameters. The fiber can be split into spans if optical amplifers (EDFAs) and/or dispersion compensating modules (DCMs) are placed along the fibre.

A set of optical amplifiers (EDFAs) located in none, one or more positions in the fiber link, separating them in different spans. EDFAs are supposed to operate in the automatic gain control mode. Thus, the gain is the same, whatever the number of input WDM channels. EDFA positions (as distance in km from the link start to the EDFA location) and EDFA gains (assumed in dB) are read from the "edfaPositions_km" and "edfaGains_dB" attributes of the links. The format of both attributes are the same: a string of numbers separated by spaces. The i-th number corresponding to the position/gain of the i-th EDFA. If the attributes do not exist, it is assumed that no EDFAs are placed in this link. EDFA specifications given by "edfa__XXX" parameters

A set of dispersion compensating modules (DCMs) located in none, one or more positions in the fiber link, separating them in different spans. If a DCM and a EDFA have the same location, it is assumed that the DCM is placed first, to reduce the non-linear effects. DCM positions (as distance in km from the link start to the DCM location) are read from the "dcmPositions_km" attribute of the link, and the same format as with "edfaPositions_km" attribute is expected. If the attribute does not exist, it is assumed that no DCMs are placed in this link. DCM specifications are given by "dcm__XXX" parameters

At the receiver end, WDM channels in the links are separated using a demultiplexer, with specifications given by "mux__XXX" parameters

Each channel ends in a receiver, with specifications given by "tp__XXX" parameters

The basic checks performed are:

Signal power levels are within operating ranges at the mux/demux/edfas/dcms and receivers, both when the link has one single active channel, or when all the "channels__maxNumChannels" are active

Chromatic dispersion is within the operating ranges in every point of the fiber, and at the receiver.

Optical Signal to Noise Ration (OSNR) is within the operating range at the receiver.

Polarization mode dispersion (PMD) is within the operating range at the receiver.

Input Parameters

Name	Value	Description
report__checkCDOnlyAtTheReceiver	true	If true, the chromatic dispersion only is checked against the CD tolerance at the receiver. If false, it is checked against the same value, in all the fiber spans
channels__minChannelLambda_nm	1530.33	Channel minimum wavelength in nm
channels__channelSpacing_GHz	100	Channel spacing in GHz
channels__maxNumChannels	16	Maximum number of WDM channels that will be used
fiber__ituType	G.655	ITU-T fiber type
fiber__attenuation_dB_per_km	0.25	Fiber attenuation in dB/km
fiber__worseChromaticDispersion_ps_per_nm_per_km	6	Chromatic dispersion of the fiber in ps/nm/km
fiber__PMD_ps_per_sqroot_km	0.5	Polarization mode dispersion per km^0.5 of fiber (PMD_Q link factor)
tp__outputPower_dBm	6	Output power of the transmitter in dBm
tp__maxChromaticDispersionTolerance_ps_per_nm	800	Maximum chromatic dispersion tolerance in ps/nm at the receiver
tp__minOSNR_dB	10	Minimum OSNR needed at the receiver
tp__inputPowerSensitivityMin_dBm	-18	Minimum input power at the receiver in dBm
tp__inputPowerSensitivityMax_dBm	-8	Maximum input power at the receiver in dBm
tp__minWavelength_nm	1529.55	Minimum wavelength usable by the transponder
tp__maxWavelength_nm	1561.84	Maximum wavelength usable by the transponder
tp__pmdTolerance_ps	10	Maximum tolarance of polarizarion mode dispersion (mean of differential group delay) in ps at the receiver
edfa__minWavelength_nm	1530	Minimum wavelength usable by the EDFA
edfa__maxWavelength_nm	1563	Maximum wavelength usable by the EDFA
edfa__minInputPower_dBm	-29	Minimum input power at the EDFA
edfa__maxInputPower_dBm	2	Maximum input power at the EDFA
edfa__minOutputPower_dBm	-6	Minimum output power at the EDFA
edfa__maxOutputPower_dBm	19	Maximum output power at the EDFA
edfa__minGain_dB	17	Minimum gain at the EDFA
edfa__maxGain_dB	23	Maximum gain at the EDFA

edfa__PMD_ps	0.5	Polarization mode dispersion in ps added by the EDFA
edfa__noiseFactorMaximumGain_dB	5.4	Noise factor at the EDFA when the gain is in its upper limit (linear interpolation is used to estimate the noise figura at other gains)
edfa__noiseFactorMinimumGain_dB	6.4	Noise factor at the EDFA when the gain is in its lower limit (linear interpolation is used to estimate the noise figura at other gains)
edfa__noiseFactorReferenceBandwidth_nm	0.5	Reference bandwidth that measures the noise factor at the EDFA
dcm__worseCaseChannelDispersion_ps_per_nm	-551	Dispersion compensation (ps/nm) in the WDM channel with lower dispersion in absolute number
dcm__PMD_ps	0.7	Polarization mode dispersion in ps added by the DCM
dcm__insertionLoss_dB	3.5	Maximum insertion loss added by the DCM
mux__insertionLoss_dB	5.1	Maximum insertion loss in dB added by the mux/demux
mux__PMD_ps	0.5	Polarization mode dispersion in ps added by the mux/demux
mux__maxInputPower_dBm	24	Maximum input power in dBm at the mux/demux
osnrPenalty__CD_dB	1	OSNR penalty caused by residual chromatic dispersion (assumed within limits)
osnrPenalty__nonLinear_dB	2	OSNR penalty caused by the non-linear effects SPM, XPM, FWM and Brillouin / Raman scattering
osnrPenalty__PMD_dB	0.5	OSNR penalty caused by the polarization mode dispersion (assumed within limits)
osnrPenalty__PDL_dB	0.3	OSNR penalty caused by polarization dispersion losses
osnrPenalty__transmitterChirp_dB	0.5	OSNR penalty caused by transmitter chirp
osnrPenalty__muxDemuxCrosstalk_dB	0.2	OSNR penalty caused by the crosstalk at the mux and the demux
osnrPenalty__unassignedMargin_dB	3	OSNR penalty caused by not assigned margins (e.g. random effects, aging, ...)

ANEXO C: ATLANTA NETWORK WDM LINE ENGINEERING REPORT

Input Parameters

Name	Value	Description
report__checkCDOnlyAtTheReceiver	true	If true, the chromatic dispersion only is checked against the CD tolerance at the receiver. If false, it is checked against the same value, in all the fiber spans
channels__minChannelLambda_nm	1530.33	Channel minimum wavelength in nm
channels__channelSpacing_GHz	100	Channel spacing in GHz
channels__maxNumChannels	16	Maximum number of WDM channels that will be used
fiber__ituType	G.655	ITU-T fiber type
fiber__attenuation_dB_per_km	0.25	Fiber attenuation in dB/km
fiber__worseChromaticDispersion_ps_per_nm_per_km	6	Chromatic dispersion of the fiber in ps/nm/km
fiber__PMD_ps_per_sqroot_km	0.5	Polarization mode dispersion per km^0.5 of fiber (PMD_Q link factor)
tp__outputPower_dBm	6	Output power of the transmitter in dBm
tp__maxChromaticDispersionTolerance_ps_per_nm	800	Maximum chromatic dispersion tolerance in ps/nm at the receiver
tp__minOSNR_dB	10	Minimum OSNR needed at the receiver
tp__inputPowerSensitivityMin_dBm	-18	Minimum input power at the receiver in dBm
tp__inputPowerSensitivityMax_dBm	-8	Maximum input power at the receiver in dBm

tp__minWavelength_nm	1529.55	Minimum wavelength usable by the transponder
tp__maxWavelength_nm	1561.84	Maximum wavelength usable by the transponder
tp__pmdTolerance_ps	10	Maximum tolarance of polarizarion mode dispersion (mean of differential group delay) in ps at the receiver
edfa__minWavelength_nm	1530	Minimum wavelength usable by the EDFA
edfa__maxWavelength_nm	1563	Maximum wavelength usable by the EDFA
edfa__minInputPower_dBm	-29	Minimum input power at the EDFA
edfa__maxInputPower_dBm	2	Maximum input power at the EDFA
edfa__minOutputPower_dBm	-6	Minimum output power at the EDFA
edfa__maxOutputPower_dBm	19	Maximum output power at the EDFA
edfa__minGain_dB	17	Minimum gain at the EDFA
edfa__maxGain_dB	23	Maximum gain at the EDFA
edfa__PMD_ps	0.5	Polarization mode dispersion in ps added by the EDFA
edfa__noiseFactorMaximumGain_dB	5.4	Noise factor at the EDFA when the gain is in its upper limit (linear interpolation is used to estimate the noise figura at other gains)
edfa__noiseFactorMinimumGain_dB	6.4	Noise factor at the EDFA when the gain is in its lower limit (linear interpolation is used to estimate the noise figura at other gains)

edfa__noiseFactorReferenceBandwidth_nm	0.5	Reference bandwidth that measures the noise factor at the EDFA
dcm__worseCaseChannelDispersion_ps_per_nm	-551	Dispersion compensation (ps/nm) in the WDM channel with lower dispersion in absolute number
dcm__PMD_ps	0.7	Polarization mode dispersion in ps added by the DCM
dcm__insertionLoss_dB	3.5	Maximum insertion loss added by the DCM
mux__insertionLoss_dB	5.1	Maximum insertion loss in dB added by the mux/demux
mux__PMD_ps	0.5	Polarization mode dispersion in ps added by the mux/demux
mux__maxInputPower_dBm	24	Maximum input power in dBm at the mux/demux
osnrPenalty__CD_dB	1	OSNR penalty caused by residual chromatic dispersion (assumed within limits)
osnrPenalty__nonLinear_dB	2	OSNR penalty caused by the non-linear effects SPM, XPM, FWM and Brillouin / Raman scattering
osnrPenalty__PMD_dB	0.5	OSNR penalty caused by the polarization mode dispersion (assumed within limits)
osnrPenalty__PDL_dB	0.3	OSNR penalty caused by polarization dispersion losses
osnrPenalty__transmitterChirp_dB	0.5	OSNR penalty caused by transmitter chirp

osnrPenalty__muxDemuxCrosstalk_dB	0.2	OSNR penalty caused by the crosstalk at the mux and the demux
osnrPenalty__unassignedMargin_dB	3	OSNR penalty caused by not assigned margins (e.g. random effects, aging, ...)

ANEXO D: EON NETWORK WDM LINE ENGINEERING REPORT

Input Parameters

Name	Value	Description
report__checkCDOnlyAtTheReceiver	true	If true, the chromatic dispersion only is checked against the CD tolerance at the receiver. If false, it is checked against the same value, in all the fiber spans
channels__minChannelLambda_nm	1530.33	Channel minimum wavelength in nm
channels__channelSpacing_GHz	100	Channel spacing in GHz
channels__maxNumChannels	16	Maximum number of WDM channels that will be used
fiber__ituType	G.655	ITU-T fiber type
fiber__attenuation_dB_per_km	0.25	Fiber attenuation in dB/km
fiber__worseChromaticDispersion_ps_per_nm_per_km	6	Chromatic dispersion of the fiber in ps/nm/km
fiber__PMD_ps_per_sqroot_km	0.5	Polarization mode dispersion per km^0.5 of fiber (PMD_Q link factor)
tp__outputPower_dBm	6	Output power of the transmitter in dBm

tp__maxChromaticDispersionTolerance_ps_per_nm	800	Maximum chromatic dispersion tolerance in ps/nm at the receiver
tp__minOSNR_dB	10	Minimum OSNR needed at the receiver
tp__inputPowerSensitivityMin_dBm	-18	Minimum input power at the receiver in dBm
tp__inputPowerSensitivityMax_dBm	-8	Maximum input power at the receiver in dBm
tp__minWavelength_nm	1529.55	Minimum wavelength usable by the transponder
tp__maxWavelength_nm	1561.84	Maximum wavelength usable by the transponder
tp__pmdTolerance_ps	10	Maximum tolarance of polarizarion mode dispersion (mean of differential group delay) in ps at the receiver
edfa__minWavelength_nm	1530	Minimum wavelength usable by the EDFA
edfa__maxWavelength_nm	1563	Maximum wavelength usable by the EDFA
edfa__minInputPower_dBm	-29	Minimum input power at the EDFA
edfa__maxInputPower_dBm	2	Maximum input power at the EDFA
edfa__minOutputPower_dBm	-6	Minimum output power at the EDFA
edfa__maxOutputPower_dBm	19	Maximum output power at the EDFA
edfa__minGain_dB	17	Minimum gain at the EDFA
edfa__maxGain_dB	23	Maximum gain at the EDFA

edfa__PMD_ps	0.5	Polarization mode dispersion in ps added by the EDFA
edfa__noiseFactorMaximumGain_dB	5.4	Noise factor at the EDFA when the gain is in its upper limit (linear interpolation is used to estimate the noise figura at other gains)
edfa__noiseFactorMinimumGain_dB	6.4	Noise factor at the EDFA when the gain is in its lower limit (linear interpolation is used to estimate the noise figura at other gains)
edfa__noiseFactorReferenceBandwidth_nm	0.5	Reference bandwidth that measures the noise factor at the EDFA
dcm__worseCaseChannelDispersion_ps_per_nm	-551	Dispersion compensation (ps/nm) in the WDM channel with lower dispersion in absolute number
dcm__PMD_ps	0.7	Polarization mode dispersion in ps added by the DCM
dcm__insertionLoss_dB	3.5	Maximum insertion loss added by the DCM
mux__insertionLoss_dB	5.1	Maximum insertion loss in dB added by the mux/demux
mux__PMD_ps	0.5	Polarization mode dispersion in ps added by the mux/demux
mux__maxInputPower_dBm	24	Maximum input power in dBm at the mux/demux
osnrPenalty__CD_dB	1	OSNR penalty caused by residual chromatic dispersion (assumed within limits)

osnrPenalty__nonLinear_dB	2	OSNR penalty caused by the non-linear effects SPM, XPM, FWM and Brillouin / Raman scattering
osnrPenalty__PMD_dB	0.5	OSNR penalty caused by the polarization mode dispersion (assumed within limits)
osnrPenalty__PDL_dB	0.3	OSNR penalty caused by polarization dispersion losses
osnrPenalty__transmitterChirp_dB	0.5	OSNR penalty caused by transmitter chirp
osnrPenalty__muxDemuxCrosstalk_dB	0.2	OSNR penalty caused by the crosstalk at the mux and the demux
osnrPenalty__unassignedMargin_dB	3	OSNR penalty caused by not assigned margins (e.g. random effects, aging, ...)