

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE ALGORITMOS RSA Y RWA  
SOBRE UNA RED ÓPTICA BASADA EN LA TOPOLOGÍA NSFNET**



**Andrés Felipe Sevilla Majin  
Edward Camilo Zúñiga Quisoboní**

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT  
Popayán, Abril de 2017**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO DE ALGORITMOS RSA Y RWA  
SOBRE UNA RED ÓPTICA BASADA EN LA TOPOLOGÍA NSFNET**



**Andrés Felipe Sevilla Majin  
Edward Camilo Zúñiga Quisoboní**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de  
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

**Director: Ph.D. Ing. José Giovanni López Perafán**

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT  
Popayán, Abril de 2017**



## TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.2 ESCENARIO DE MOTIVACIÓN .....	2
1.3 OBJETIVOS .....	3
1.4 ENFOQUE.....	3
1.5 ALCANCE .....	5
1.6 APORTES .....	6
1.7 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....	6
CAPÍTULO 2: GENERALIDADES DE REDES ÓPTICAS .....	7
2.1 TÉCNICAS DE MULTIPLEXACIÓN EN REDES ÓPTICAS .....	7
2.2 COMPONENTES DE UN SISTEMA WDM .....	10
2.3 TÉCNICAS DE CONMUTACIÓN EN REDES ÓPTICAS .....	12
2.4 GENERALIDADES DE REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS (FLEXGRID) .....	14
CAPÍTULO 3: ENRUTAMIENTO Y ASIGNACIÓN DE RECURSOS EN REDES OBS.....	23
3.1 REDES POR CONMUTACIÓN ÓPTICA DE RÁFAGAS (OBS) .....	23
3.2 RWA - ENRUTAMIENTO Y ASIGNACIÓN DE LONGITUD DE ONDA EN REDES OBS/WDM.....	33
3.3 RSA - ENRUTAMIENTO Y ASIGNACIÓN DE ESPECTRO EN REDES OBS/FLEXGRID .....	37
CAPÍTULO 4: IMPLEMENTACIÓN .....	47
4.1 METODOLOGÍA.....	47
4.2 SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN .....	48
4.3 IMPLEMENTACIÓN DE LOS MÓDULOS DE LA RED OBS.....	51
4.4 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS ALGORITMOS RWA Y RSA SELECCIONADOS.....	56
CAPÍTULO 5: ESCENARIOS DE SIMULACIÓN Y PRUEBAS.....	63
5.1 INTRODUCCIÓN.....	63
5.2 CASOS DE SIMULACIÓN .....	63
5.3 PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN PARA LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN .....	65
5.4 EJECUCIÓN DE LAS SIMULACIONES.....	66
5.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	67
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	79
6.1 CONCLUSIONES.....	79
6.2 RECOMENDACIONES.....	80
6.3 TRABAJOS FUTUROS.....	81

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Enfoque del trabajo de grado.....	5
Figura 2.1 Sistema WDM.....	8
Figura 2.2 Ventanas de operación en redes ópticas.....	10
Figura 2.3 Arquitectura de red WDM.....	10
Figura 2.4 Funcionalidades de un OXC.....	12
Figura 2.5 Plan de frecuencias ITU-T G.694.1.....	15
Figura 2.6 Concepto de Frequency slot.....	16



Figura 2.7 Ejemplo asignación de canales en (a) rejilla fija de 50 GHz (WDM) (b) rejilla flexible (Flexgrid).	17
Figura 2.8 Asignación de espectro mediante WDM vs Flexgrid	18
Figura 2.9 Señal OFDM en el dominio de la frecuencia.	19
Figura 2.10 Respuesta en frecuencia (a) y en el tiempo (b) de una señal N-WDM.	20
Figura 2.11 Arquitectura de una Red Óptica Elástica (EON)(1).	21
Figura 2.12 Arquitectura de una Red Óptica Elástica (EON)(2).	22
Figura 3.1 Red por Conmutación Óptica de Ráfagas.	24
Figura 3.2 Proceso de Envío de una ráfaga en OBS	25
Figura 3.3 Diagrama Funcional de una red OBS.	25
Figura 3.4 Arquitectura Nodo Frontera OBS.	26
Figura 3.5 Arquitectura Nodo Central OBS.	29
Figura 3.6 Funcionamiento del protocolo de señalización JIT.	31
Figura 3.7 Funcionamiento del protocolo de señalización JET.	32
Figura 3.8 Efecto de la carga en los esquemas de ensamblaje por temporizador y umbral de longitud de ráfaga.	33
Figura 3.9 Representación lógica de un enlace de fibra óptica en FlexGrid.	38
Figura 3.10 Topología de red con 6 nodos y 8 enlaces.	39
Figura 3.11 Establecimiento de una conexión óptica elástica.	40
Figura 3.12 Esquema de asignación de espectro fijo	41
Figura 3.13 Esquema de Asignación de Espectro Semi-Elástico	42
Figura 3.14 Esquema de Asignación de Espectro Elástico con Expansión/Contracción	42
Figura 3.15 Esquema de Asignación de Espectro Elástico con Reasignación	43
Figura 4.1 Metodología propuesta para el desarrollo y simulación del sistema.	47
Figura 4.2 Módulo Fuente/Destino en OMNeT++	51
Figura 4.3 Nodo Frontera de ingreso y egreso	52
Figura 4.4 Submódulos que conforman el Nodo Frontera	52
Figura 4.5 Conexión entre el Nodo Frontera y el Nodo Central de una red OBS	54
Figura 4.6 Módulos que conforman el Nodo Central	54
Figura 4.7 Módulos Unidad de control	55
Figura 4.8 Topología NSFNeT.	55
Figura 4.9 Red OBS basada en la topología NSFNeT implementada.	56
Figura 4.10 Diagrama de Flujo Algoritmo de Dijkstra.	58
Figura 4.11 Diagrama de Flujo Algoritmo LAUC	60
Figura 4.12 Diagrama de Flujo Algoritmo heurístico - LAUC	61
Figura 5.1 Probabilidad de bloqueo vs Tráfico. a) 1 Gbps b) 2.5 Gbps	68
Figura 5.2 Porcentaje de ráfagas perdidas vs Tráfico. a) 1 Gbps b) 2.5 Gbps	69
Figura 5.3 Probabilidad de bloqueo red NSFNET OBS/WDM, 1 y 2.5 Gbps.	70
Figura 5.4 Probabilidad de bloqueo red NSFNET OBS/FlexGrid, 1 y 2.5 Gbps.	70
Figura 5.5 Retardo extremo a extremo vs Tráfico. a) 1 Gbps b) 2.5 Gbps	71
Figura 5.6 Probabilidad de bloqueo vs Tráfico. a) 1 Gbps b) 2.5 Gbps	73
Figura 5.7 Porcentaje de Ráfagas Perdidas vs Tráfico. a) 1 Gbps b) 2.5 Gbps.	74
Figura 5.8 Retardo extremo a extremo vs Tráfico. a) 1 Gbps b) 2.5 Gbps	75
Figura 5.9 Ráfagas Generadas, Recibidas y Perdidas, 1 Gbps	76
Figura 5.10 Ráfagas Generadas, Recibidas y Perdidas, 2.5 Gbps.	76



## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Parámetros Típicos de sistemas CWDM y DWDM .....	9
Tabla 2.2 Comparación entre sistemas de conmutación óptico . .....	14
Tabla 2.3 Expectativa de Tráfico global IP, 2015-2020. ....	14
Tabla 3.1 Algoritmos de enrutamiento . .....	35
Tabla 3.2 Algoritmos RSA encontrados en la literatura.. .....	46
Tabla 4.1 Requerimientos analizados sobre las herramientas de simulación.....	50
Tabla 5.1 Escenario y casos de simulación . .....	63
Tabla 5.2 Parámetros de diseño implementados en la red OBS/WDM .....	65
Tabla 5.3 Parámetros de diseño implementados en la red OBS/FlexGrid .....	65
Tabla 5.4 Especificaciones técnicas de los equipos utilizados . .....	66
Tabla 5.5 Parámetros Fijos de simulación, sub caso 1 . .....	67
Tabla 5.6 Parámetros Fijos de simulación, sub caso 2 .....	72
Tabla 5.7 Síntesis de los resultados de simulación .....	77



## LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>ACK</b>	<i>acknowledgement</i> , Acuse de Recibo
<b>AON</b>	<i>All Optical Network</i> , Redes Totalmente Ópticas
<b>ATM</b>	<i>Asynchronous Transfer Mode</i> , Modo de Transferencia Asíncrona
<b>AUI</b>	Administración, Utilidad e Imprevistos
<b>AW</b>	<i>Available Wavelengths</i> , Longitudes de Onda Disponibles
<b>BCG</b>	<i>Data Burst Channel Group</i> , Grupo de Canales de Ráfaga de Datos
<b>BCP</b>	<i>Burst Control Packet</i> , Paquete de Control de Ráfagas
<b>BVT</b>	<i>Bandwidth Variable Transponders</i> , Transpondedores de Ancho de Banda Variable
<b>BV-WXCs</b>	<i>Bandwidth-Variable Wavelength Cross Connect</i> , Conmutadores Ópticos Cruzados de Ancho de Banda Variable
<b>CCG</b>	<i>Control Channel Group</i> , Grupo de Canales de Control
<b>CF</b>	<i>Central Frequency</i> , Frecuencia Central
<b>CWDM</b>	<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda Dispersa
<b>DR</b>	<i>Delayed Reservation</i> , Reservación Atrasada
<b>DW</b>	<i>Distance Weight</i> , Peso por Distancia
<b>DWDM</b>	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa
<b>EDFA</b>	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> , Amplificador de Fibra Dopado de Erbio
<b>EED</b>	<i>End to End Delay</i> , Retardo Extremo a Extremo
<b>EON</b>	<i>Elastic Optical Network</i> , Red Óptica Elástica
<b>EOP</b>	<i>Elastic Optical Path</i> , Trayecto Óptico Elástico
<b>ESA</b>	<i>Elastic Spectrum Assignment</i> , Asignación de Espectro Elástico
<b>FDL</b>	<i>Fiber Delay Line</i> , Línea de Retardo de Fibra
<b>FF</b>	<i>First Fit</i> , Primer Ajuste



<b>FS</b>	<i>Frequency Slots, Intervalos de Frecuencia</i>
<b>FSA</b>	<i>Fixed Spectrum Assignment, Asignación de Espectro Fijo</i>
<b>FWDM</b>	<i>Flexible WDM, WDM Flexible</i>
<b>HAW</b>	<i>Hop and Available Wavelengths, Saltos y Longitudes de Onda Disponibles</i>
<b>HPLD</b>	<i>Heaviest Path Load Deviation, Desviación de Carga de la Peor Ruta</i>
<b>HTAW</b>	<i>Hop count and Total and Available Wavelengths, Número de Saltos, Longitudes de Onda Totales y Disponibles</i>
<b>HW</b>	<i>Hop Weight, Peso por Salto</i>
<b>IBT</b>	<i>In Band Terminator, Terminador de banda</i>
<b>IDE</b>	<i>Integrated Development Environment, Entorno de Desarrollo Integradado</i>
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos</i>
<b>ILP</b>	<i>Integer Lineal Programming, Programación Lineal Entera</i>
<b>IP</b>	<i>Internet Protocol, Protocolo de Internet</i>
<b>IPTV</b>	<i>Internet Protocol Television, Televisión por Protocolo de Internet</i>
<b>ITU</b>	<i>International Telecommunication Union, Unión Internacional de Telecomunicaciones</i>
<b>JET</b>	<i>Just Enough Time, Tiempo Justo</i>
<b>JIT</b>	<i>Just In Time, Justo a Tiempo</i>
<b>LAUC</b>	<i>Latest Available Unscheduled Channel, Último Canal Disponible sin Planificación</i>
<b>LBRWA</b>	<i>Load Balance RWA, Balance de Carga de Enrutamiento y Asignaciones de Longitud de Onda</i>
<b>LCPR</b>	<i>Least Congested Path Routing, Enrutamiento de Trayecto Menos Congestionado</i>
<b>LL</b>	<i>Least Loaded, Menos Cargado</i>
<b>LSS</b>	<i>Lowest Starting Slot, Slot de Inicio más Bajo</i>
<b>LU</b>	<i>Least Used, Menos usado</i>



<b>MAN</b>	<i>Metropolitan Area Network</i> , Red de Área Metropolitana
<b>MFC</b>	<i>Modified Future Cost</i> , Costo Futuro Modificado
<b>MP</b>	<i>Min Product</i> , Producto Mínimo
<b>MS</b>	<i>Min Sum</i> , Mínima Suma
<b>MSP</b>	<i>Modified Dijkstra's Shortest Path</i> , Camino más Corto Dijkstra Modificado
<b>MΣ</b>	<i>Max Sum</i> , Máxima Suma
<b>MU</b>	<i>Most Used</i> , Más Usado
<b>NGN</b>	<i>Next Generation Network</i> , Redes de Próxima Generación
<b>MNH</b>	<i>Minimum Number of Hops</i> , Mínimo Número de Saltos
<b>NCTUNS</b>	<i>National Chiao Tung University Network Simulator</i>
<b>NP</b>	<i>Non Deterministic Polynomial Time</i> , Problema de Tiempo Polinomial no Determinístico
<b>NS-2</b>	<i>Network simulator 2</i>
<b>NS-3</b>	<i>Network simulator 3</i>
<b>NSFNET</b>	<i>National Science Foundation Network</i> , Red de Fundación Nacional para la Ciencia
<b>N-WDM</b>	<i>Nyquist WDM</i>
<b>OADM</b>	<i>Optical Add/Drop Multiplexers</i> , Multiplexores de Inserción/extracción de canales ópticos
<b>OAWG</b>	<i>Dynamic Optical Arbitrary Waveform Generation</i> , Generación de Formas de Onda Arbitrarias Ópticas Dinámicas
<b>OBS</b>	<i>Optical Burst Switching</i> , Conmutación Óptica de Ráfagas
<b>OCS</b>	<i>Optical Circuit Switching</i> , Conmutación Óptica de Circuitos
<b>OFDM</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal
<b>OLT</b>	<i>Optical Line Terminal</i> , Terminales de Línea Óptica
<b>O-OFDM</b>	<i>Optical OFDM</i> , Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal Óptica





<b>OPS</b>	<i>Optical Packet Switching</i> , Conmutación Óptica de Paquetes
<b>OSI</b>	<i>Open System Interconnection</i> , Interconexión de Sistemas Abiertos
<b>OTN</b>	<i>Optical Transport Network</i> , Red de Transporte Óptico
<b>OXC</b>	<i>Optical Cross-Connect</i> , Conmutador Óptico
<b>PB</b>	Probabilidad de Bloqueo
<b>PCE</b>	<i>Path Computation Element</i> , Elemento de cálculo de ruta
<b>QoS</b>	<i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio
<b>RF</b>	<i>Random Fit</i> , Ajuste Aleatorio
<b>RFD</b>	<i>Reserve a Fixed Duration</i> , Reserva de Duración Fija
<b>RSA</b>	<i>Routing and Spectrum Allocation</i> , Enrutamiento y Asignación de Espectro
<b>RWA</b>	<i>Routing and Wavelength Assignment</i> , Enrutamiento y Asignación de Longitud de Onda
<b>SA</b>	<i>Spectrum Assignment</i> , Asignación de Espectro
<b>SDH</b>	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i> , Jerarquía Digital Síncrona
<b>SDM</b>	<i>Space Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Espacio
<b>SF</b>	<i>Smallest Fit</i> , Ajuste más Pequeño
<b>SONET</b>	<i>Synchronous Optical Network</i> , Red Óptica Síncrona.
<b>SP</b>	<i>Shortest Path</i> , Trayecto más Corto
<b>SSA</b>	<i>Semi-Elastic Spectrum Assignment</i> , Asignación de Espectro Semi-Elastico
<b>TAG</b>	<i>Tell And Go</i>
<b>TAW</b>	<i>Total and Available Wavelengths</i> , Longitudes de Onda Totales y Disponibles
<b>TDM</b>	<i>Time Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División en el Tiempo
<b>TP</b>	<i>Threshold Protection</i> , Umbral de Protección
<b>VF</b>	Void Filling, Relleno de Huecos
<b>VoIP</b>	<i>Voice over IP</i> , Voz sobre IP



<b>WA</b>	<i>Wavelength Assignment</i> , Asignación de Longitud de Onda
<b>WAN</b>	<i>Wide Area Network</i> , Red de Área Amplia
<b>WDM</b>	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda
<b>WR</b>	<i>Wavelength Reservation</i> , Reserva de Longitudes de Onda



## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El rápido desarrollo de nuevos servicios y aplicaciones en telecomunicaciones<sup>1</sup> con exigencias de tiempo real ha dado como resultado el incremento de grandes flujos de datos [1]. Hoy en día, se observa que la necesidad de conectarse a Internet está aumentando y diversificando cada vez más [2]. Además, la demanda de nuevos servicios en telecomunicaciones (IPTV, video bajo demanda, *streaming*, almacenamiento en la nube, etc.) con grandes requerimientos de ancho de banda<sup>2</sup> ha impulsado a la industria de las telecomunicaciones a buscar nuevas soluciones para aumentar la capacidad y añadir mayor flexibilidad a las redes de transporte óptico actuales [3], [4].

De esta manera, las redes de comunicaciones ópticas actuales cuentan con la capacidad necesaria para transportar esos altos volúmenes de información, específicamente, las redes ópticas basadas en la Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*), las cuales permiten conexiones ópticas de gran capacidad [5], ya que permite el transporte de información simultáneamente por una misma fibra usando diferentes longitudes de onda. Sin embargo, su arquitectura de red es rígida para las perspectivas de tráfico futuras [6], puesto que cada conexión óptica ocupa la misma cantidad de espectro durante todo su tiempo de operación, siendo el ancho ocupado igual para todas las conexiones [7], es decir que se utiliza una rejilla espectral fija (CWDM - *Coarse Wavelength Division Multiplexing* o *Dense Wavelength Division Multiplexing* - DWDM), causando un bajo rendimiento del ancho de banda disponible y poca flexibilidad para adaptarse a las variaciones del tráfico [3].

Debido a lo anterior, como respuesta a las crecientes necesidades de capacidad y de diferentes granularidades de tráfico [8], se ha propuesto una nueva arquitectura de transporte para redes ópticas conocida como Redes Ópticas Elásticas (EON, *Elastic Optical Networks*) o redes ópticas FlexGrid<sup>3</sup> [3], las cuales se caracterizan por dividir el espectro en segmentos (definidos por una frecuencia central y un ancho de segmento) de menor tamaño que en WDM, de manera que se aprovecha mejor el ancho de banda que se estaba desperdiciando en este tipo de redes; además, se permite la utilización de varios formatos de modulación en una misma conexión [9], lo cual brinda la posibilidad de ajustar la velocidad de transmisión a las necesidades del cliente mediante la elección del número de subportadoras a transmitir [3]. Igualmente, la implementación de modulación multiportadora permite también una granularidad más fina a la hora de crear canales (definidos por una frecuencia central y el número de segmentos que lo conforman) con anchos de banda variables, que se adapten mejor a la demanda del usuario. Sin embargo, esto puede introducir complejidad adicional a la hora de realizar los procesos de enrutamiento y asignación de recursos (que para este caso, consiste en porciones de espectro continuo) [3].

---

<sup>1</sup> Comunicación a distancia para la transmisión y recepción de señales de cualquier naturaleza.

<sup>2</sup> Rango de frecuencias en las que se concentra la mayor parte de la potencia de la señal.

<sup>3</sup> FlexGrid es la propuesta tecnológica para la implementación en las redes ópticas del futuro. De aquí en adelante se utilizará este término para referirse a las redes ópticas elásticas (EON).



Para la asignación de los recursos espectrales en las redes de transporte óptico WDM, se llevaron a cabo muchos estudios para abordar el problema de enrutamiento y asignación de longitud de onda (RWA, *Routing and Wavelength Assignment*) y se han propuesto varios algoritmos RWA [10] [11]. Mientras tanto, en las redes ópticas elásticas aparece el problema de enrutamiento y asignación de espectro (RSA, *Routing and Spectrum Allocation*). Por un lado el problema de enrutamiento (Routing), que consiste en el cálculo de la ruta entre el nodo origen y el destino a través de la topología de la red; y por otro, la selección de los recursos espectrales que se asignarán a la petición. Para las redes WDM, se asigna una longitud de onda específica y un ancho de banda fijo para cada conexión (WA, *Wavelength Assignment*), mientras que en una EON o FlexGrid se asigna una frecuencia central y un ancho de banda variable, el cual depende de los requerimientos del servicio, logrando un mejor uso de los recursos espectrales que no se consigue en las redes WDM. De esta manera, el espectro asignado a cada conexión óptica en una EON debe cumplir dos condiciones: debe ser contiguo y continuo. La contigüidad es la restricción de que todos los segmentos que ocupa una conexión óptica deben ser adyacentes; por otro lado, la continuidad del espectro requiere que el canal asignado a una conexión sea el mismo en todos los enlaces usados por dicha conexión [7], [12].

Teniendo presente que, el aumento de tráfico en las redes y la demanda de nuevos servicios en telecomunicaciones con grandes requerimientos de ancho de banda, han impulsado a los investigadores a buscar una tecnología de red óptica (FlexGrid) capaz de aprovechar en mejor forma el espectro disponible que en las redes convencionales (WDM), este proyecto de grado busca implementar un modelo de red óptica que permita evaluar el comportamiento de algoritmos RSA (FlexGrid) y RWA (WDM) sobre la topología de red NSFNET<sup>4</sup>, por lo que se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿El desempeño de una red óptica con tecnología FlexGrid (EON - implementando algoritmos RSA) mejora respecto a las redes convencionales (WDM - implementando algoritmos RWA) sobre la topología de red óptica NSFNET?

## 1.2 ESCENARIO DE MOTIVACIÓN

En la actualidad (2017), las redes de comunicaciones ópticas han sido sometidas a grandes cambios debido a la necesidad de soportar grandes volúmenes de tráfico, ligados al crecimiento exponencial de usuarios y la demanda de aplicaciones con grandes requerimientos de ancho de banda [13]. Con el fin de aprovechar la capacidad de la fibra óptica, en primer lugar se implementó la multiplexación por división de longitud de onda (WDM), que consiste en transmitir información a través de diferentes longitudes de onda sobre una misma fibra óptica, con un ancho de banda estático asociado a cada longitud de onda. En los próximos años, el incremento de tráfico en las redes va a ser tal que éstas no van a dar abasto y por tanto se requiere de redes ópticas que aprovechen de mejor forma el ancho de banda de la fibra. Por lo tanto, surge la idea de las redes ópticas elásticas (FlexGrid o EON), que consiste en dividir el espectro óptico en intervalos de frecuencia con una granularidad más fina que en WDM, permitiendo asignar la cantidad

---

<sup>4</sup> Se elige NSFNET por ser la topología de red más utilizada en procesos de análisis y simulación de redes ópticas. Además, cuenta con una topología irregular, con un número considerable de nodos y enlaces de diferentes longitudes.



de espectro justo para un determinado servicio y de esa manera ahorrar espectro que puede ser utilizado para prestar otros servicios [3] [9].

Así mismo, la información debe entregarse a su destino cumpliendo con criterios de calidad de servicio<sup>5</sup> y desempeño<sup>6</sup> a nivel de red (OSI), como probabilidad de bloqueo, retardo extremo a extremo, disponibilidad y throughput. Existen varios parámetros que influyen en el desempeño de la red, tales como las técnicas de enrutamiento, asignación de recursos, ensamble de ráfagas (en redes OBS), ingeniería de tráfico, entre otros.

El ensamble de ráfagas en las redes OBS, está catalogado como un problema de Tiempo Polinomial no Determinístico Completo (NP- Completo, *Non Deterministic Polynomial Time*), lo cual dificulta hallar un algoritmo determinístico, por lo que se acude a técnicas heurísticas, las cuales ofrecen ventajas respecto a escalabilidad y robustez.

En conclusión, en el presente documento final de trabajo de grado, se tiene como objetivo analizar comparativamente el desempeño a nivel de red desde la perspectiva OSI de los algoritmos RWA (para WDM) y RSA (para FlexGrid), con parámetros de desempeño como probabilidad de bloqueo y retardo extremo a extremo, usando la tecnología de conmutación óptica por ráfagas (OBS), aplicados en una red óptica con topología NSFNeT.

### 1.3 OBJETIVOS

Para dar desarrollo al presente trabajo de grado se plantearon los siguientes objetivos:

#### 1.3.1 Objetivo general

Analizar comparativamente el desempeño de algoritmos RSA (FlexGrid) y RWA (WDM) sobre una red óptica basada en la topología NSFNeT.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las redes ópticas (WDM y FlexGrid) basadas en la topología NSFNeT sobre las cuales se realizarán las pruebas.
- Analizar diferentes algoritmos RSA-RWA y seleccionar uno por cada tecnología respectivamente para ser aplicados.
- Analizar el desempeño<sup>7</sup> mediante simulación, de los algoritmos seleccionados en las redes ópticas caracterizadas.

### 1.4 ENFOQUE

Para el desarrollo del presente trabajo de grado, se realizó un estudio bibliográfico sobre las temáticas a tratar (redes ópticas WDM y FlexGrid, sus características, arquitectura

---

<sup>5</sup> Capacidad que tiene un elemento de red para asegurar que el tráfico y requisitos del servicio establecido puedan satisfacerse.

<sup>6</sup> Calidad de funcionamiento de una red.

<sup>7</sup> Con parámetros como: probabilidad de bloqueo y retardo extremo a extremo.



funcional y diferencias), recopilando y analizando información en trabajos de investigación similares acerca de las implementaciones realizadas. En este sentido, se realizó una investigación exhaustiva en la literatura sobre los dos aspectos que se tratan en el presente trabajo de grado: enrutamiento y asignación de longitud de onda (RWA, para redes OBS/WDM) y enrutamiento y asignación de espectro (RSA, para redes OBS/FlexGrid), donde se encontraron diferentes heurísticas para afrontar ambos problemas.

En primer lugar, se caracterizaron los modelos de red óptica OBS/WDM y OBS/FlexGrid basados en la Topología de la red NSFNET, la cual es una red WAN (*Wide Area Network*) que conecta 14 ciudades de los Estados Unidos de América, con topología irregular y se encuentra incluida en numerosos estudios e investigaciones alrededor del mundo [11].

Posteriormente, y tomando como base el estudio bibliográfico realizado, se seleccionaron las heurísticas más adecuadas para los problemas RWA y RSA [3] [14] [15] [16]. De igual manera, se definieron los parámetros que caracterizan a las dos redes (OBS/WDM y OBS/FlexGrid) para la generación de los modelos de simulación implementados en el entorno de simulación de eventos discretos IDE OMNeT++.

Finalmente, se realizó la evaluación del desempeño de la red, probando las implementaciones para los algoritmos RWA y RSA seleccionados, con los parámetros de desempeño: probabilidad de bloqueo y retardo extremo a extremo. La Figura 1 permite visualizar de manera global, el proceso que se llevó a cabo para cumplir con el objetivo general del presente trabajo de grado.

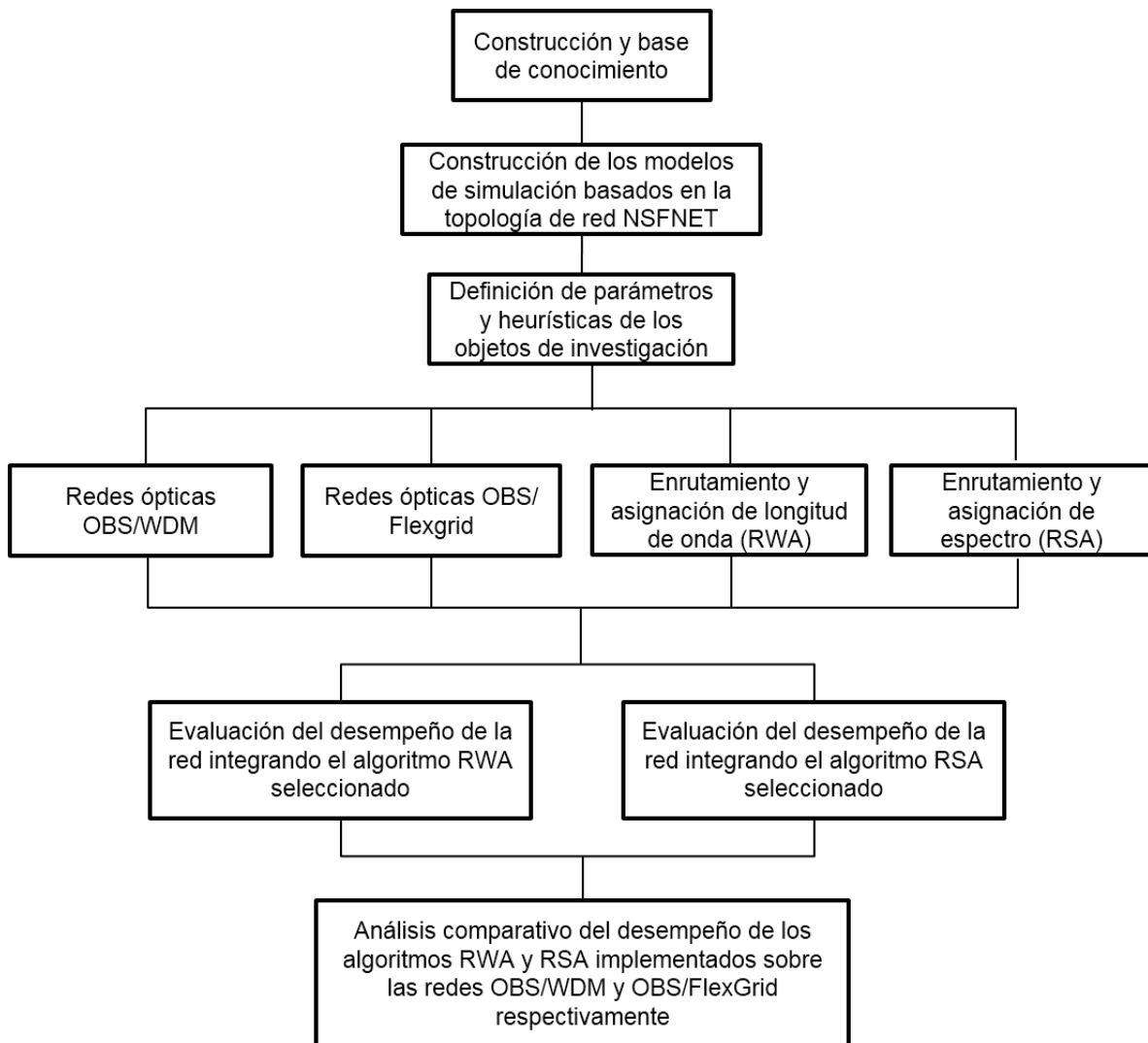


Figura 1.1 Enfoque del trabajo de grado.

## 1.5 ALCANCE

En el presente documento se explica cómo se realizó el proceso de diseño y obtención de los modelos de simulación de las redes ópticas OBS/WDM y OBS/FlexGrid sobre la topología de red NSFNET, la cual es una red de área amplia (WAN, *Wide Area Network*) que cubre Estados Unidos y consta de 14 nodos, 21 conexiones bidireccionales, con enlaces entre los 300 y 2800 km.

Con el fin de analizar el desempeño de los algoritmos definidos en los objetivos del presente trabajo de grado sobre la red NSFNET, se tuvieron dos escenarios de estudio. El primero de estos, es la red OBS con la tecnología WDM implementando algoritmos RWA; el segundo caso, consiste en la red OBS con tecnología FlexGrid implementando algoritmos RSA. En ambos casos, se utilizan velocidades de los enlaces de 1 y 2.5 Gbps para diferentes valores de tráfico, y de esta manera observar el comportamiento de la red óptica al aplicar los dos algoritmos de manera independiente, para luego comparar los resultados de ambas tecnologías.



## 1.6 APORTES

El desarrollo de este trabajo de grado contribuye a la línea investigativa del departamento de Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca y en el área específica de sistemas de comunicaciones ópticas. Los aportes del presente trabajo de grado son:

- Análisis detallado sobre el estudio y aplicación de heurísticas a procesos de enrutamiento y asignación de recursos en redes OBS/WDM y OBS/FlexGrid.
- Caracterización e implementación de la topología de red NSFNeT en la herramienta OMNeT++.
- Diseño e implementación de algoritmo para enrutamiento y asignación de longitud de onda.
- Diseño e implementación de algoritmo para enrutamiento y asignación de espectro.
- Análisis del desempeño de la red óptica al implementar las dos formas de asignación de recursos (longitud de onda y espectro).
- Informe referente a la investigación sobre el desempeño de redes OBS aplicando algoritmos RWA y RSA sobre las tecnologías WDM y FlexGrid respectivamente.

## 1.7 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

En el Capítulo 2, se abordan los conceptos básicos y temáticos relacionados con las tecnologías WDM y FlexGrid en redes ópticas. Igualmente se incluye definiciones claras sobre generalidades de redes ópticas, técnicas de multiplexación y técnicas de conmutación ópticas. Brindando así, una base del conocimiento para este trabajo de grado.

En el Capítulo 3, se hace énfasis en la técnica de conmutación óptica de ráfagas (OBS), sus características, arquitectura y funcionamiento. Además, se incluyen conceptos sobre las técnicas de enrutamiento y asignación de recursos para redes WDM y FlexGrid (elásticas), tipos de algoritmos RSA y RWA, heurísticas y meta heurísticas encontradas en la literatura.

En el Capítulo 4, se describe el proceso de implementación y caracterización en la herramienta IDE OMNeT++ de las redes NSFNeT OBS/WDM y OBS/FlexGrid, especificando cada uno de los módulos que las conforman.

En el Capítulo 5, se presentan los escenarios de simulación y pruebas, para la evaluación y análisis de desempeño de la red NSFNeT al aplicar los algoritmos RWA y RSA. Las respectivas pruebas fueron realizadas en entorno integrado de desarrollo IDE OMNeT++.

Finalmente, el Capítulo 6 contiene las conclusiones, recomendaciones y propuestas sobre posibles trabajos futuros relacionados con este trabajo de grado.





## CAPÍTULO 2: GENERALIDADES DE REDES ÓPTICAS

De acuerdo a las tareas a realizar dentro de una red, las redes de transporte de nueva generación se dividen en diferentes planos o capas de red. Generalmente, las redes están compuestas por una capa de control, una capa de gestión y una capa de datos. La capa de datos se ocupa de la transmisión de los datos de información, esta capa está conformada por enlaces y dispositivos de nivel físico; por su parte, la capa de gestión se encarga de diversas actividades como la evaluación de la seguridad de la red, administrar los reportes del estado de red, etc.; por último, la capa de control se encarga de las operaciones de enrutamiento, asignación de recursos y señalización, lo cual es el tema de investigación de este trabajo de grado [17]. De esa manera, se busca realizar un análisis de la capa de control de una red óptica haciendo énfasis en los procesos de enrutamiento y asignación de los recursos, para lo cual es necesario definir tecnologías, técnicas de multiplexación y técnicas de conmutación que se utilizan en las redes de comunicaciones por fibra óptica.

### 2.1 TÉCNICAS DE MULTIPLEXACIÓN EN REDES ÓPTICAS

A la fecha, existe una gran demanda de ancho de banda debido a nuevas aplicaciones y servicios de audio, video, televisión, video juegos e Internet; dichos requerimientos exigen sistemas más complejos y robustos; por lo cual, surgió la necesidad de optimizar el uso de los recursos con los que se cuenta en una red. Una de las estrategias para conseguirlo es utilizar técnicas de multiplexación, que permitan compartir un mismo medio entre diferentes sistemas de comunicaciones, teniendo como objetivos minimizar el número de líneas físicas requeridas y maximizar el uso de ancho de banda de la fibra [18].

En la literatura se encuentran tres tipos de multiplexación aplicadas a redes ópticas, estas son: Multiplexación por División en el Tiempo (TDM, *Time Division Multiplexing*), Multiplexación por División de Espacio (SDM, *Space Division Multiplexing*) y Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM). En este trabajo de grado, se hará énfasis en la técnica de multiplexación basada en longitud de onda (WDM), la cual se estudia en la sección 2.1.3.

#### 2.1.1 Multiplexación por División de Tiempo (TDM)

En TDM, se asigna a cada canal de comunicación un espacio de tiempo para su transmisión, estas ranuras de tiempo son enviadas una a continuación de la otra sobre un enlace y para su de-multiplexación es necesario definir tiempos de duración de tramas que ayudan a establecer el inicio y el fin de las mismas, así como bits de cabecera. El uso de información de cabecera representa una desventaja para TDM, ya que necesariamente se necesita de conversiones óptica – eléctrica y eléctrica - óptica (Óptica/Eléctrica/Óptica) en los nodos a fin de extraer esta información, además que cada canal necesita transmitir a una misma velocidad [19].

### 2.1.2 Multiplexación por División de Espacio (SDM)

En este esquema, los canales de comunicación se separan físicamente empleando varios cables agrupados en forma paralela, en otras palabras es una transmisión de información paralela. Llevando este concepto a redes ópticas, la desventaja de SDM radica en que se necesita desplegar un mayor número de cable de fibra óptica y se hace uso de un mayor número de interfaces en el conmutador óptico [19].

### 2.1.3 Multiplexación por División de Longitud de Onda

WDM es la técnica de multiplexación mas implementada en redes ópticas en la actualidad, ya que brinda efectividad al transportar un gran volumen de información sobre un mismo hilo de fibra óptica. Estos sistemas utilizan la técnica de Multiplexación para combinar dos o más señales ópticas a través de señales portadoras, las cuales tienen diferentes longitudes de onda que viajan por un mismo medio óptico; de esta manera se explota el ancho de banda que este ofrece [20].

El esquema general de una red óptica WDM consta de un transmisor WDM, una serie de segmentos de fibra y un recetor WDM. En el transmisor, el multiplexor recibe cada una de las señales ópticas con su respectiva longitud de onda, los combina y los transmite sobre la misma fibra óptica, el espectro del canal óptico resultante contendrá todas las longitudes de onda. Luego, durante el proceso de recepción, un demultiplexor separa cada señal según la información de longitud de onda, como se aprecia en la Figura 2.1 [19].

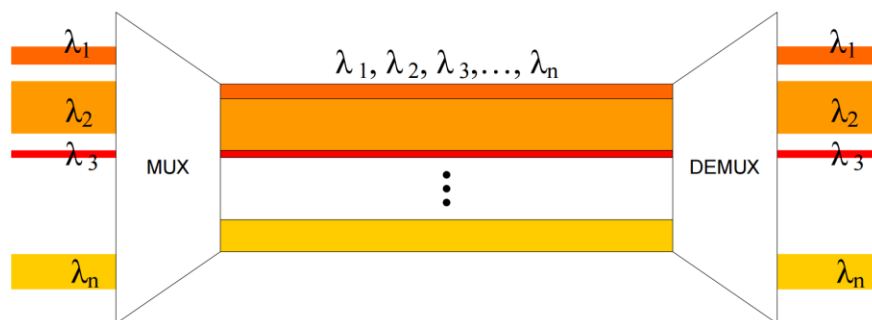


Figura 2.1 Sistema WDM. Tomada de [19]

Dado lo anterior, los sistemas WDM se pueden clasificar de acuerdo a la aplicación de la siguiente manera: Multiplexación por División de Longitud de Onda Dispersa (CWDM, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*), utilizada en cortas distancias, y Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*), usado para cortas y largas distancias. Para los cuales, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunication Union*) ha definido las recomendaciones G.694.1 [21] y G.694.2 [22] proporcionando respectivamente los parámetros típicos de estas redes, como se muestra en el Tabla 2.1.



Tabla 2.1 Parámetros Típicos de sistemas CWDM y DWDM [21] [22].

CARACTERÍSTICAS	CWDM	DWDM MAN/WAN	DWDM Largo Alcance
Espaciamiento de los Canales	20nm (2500GHz)	0.8nm (100GHz)	0.4nm (50GHz)
Ventanas Utilizadas	O, E, S, C, L	C, L	C, L, S
Canales por Fibra	4 -16	32 – 80	80 – 160
Capacidad por Canal	2.5Gb/s	10Gb/s	10 - 40Gb/s
Distancias Típicas	Hasta 80Km	Cientos de Km	Miles de Km
Costos	Bajo	Medio	Alto

Como se observa en la Tabla 2.1, las dos variantes de WDM difieren principalmente en los espaciamientos entre los canales o longitudes de onda, la capacidad que soporta cada sistema, la distancia que puede recorrer la señal óptica sin recurrir a regeneradores y amplificadores ópticos y los costos. En las siguientes secciones (2.1.3.1 y 2.1.3.2) se explicaran en mayor detalle estas variantes de WDM.

#### 2.1.1.1 Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa (DWDM)

Este tipo de sistemas permite multiplexar en una sola fibra muchas portadoras ópticas en distintas longitudes de onda, debido a que se utiliza un espaciamiento mínimo entre los canales ópticos (25 GHz, 50GHz o 100 GHz), permitiendo transportar desde 40 hasta 160 canales ópticos en el mejor de los casos. Para los sistemas DWDM en la recomendación ITU-T G.694.1, se definen los espaciamientos empleados, los cuales van desde los 25 hasta los 100 GHz [23]; lo que permite aumentar la capacidad de transporte de información, ya que al disminuir el espaciamiento entre longitudes de onda se logra que muchas de ellas se multiplexen sobre una misma fibra óptica.

Los sistemas DWDM trabajan en la tercera ventana de operación del espectro, la cual corresponde a la banda C extendida, esta región comprende toda la banda C, parte de la banda S y la banda L, es decir va en el rango de 1500 a 1600 nm como se muestra en la Figura 2.2. El estándar ITU G.694.1 recomienda esta banda para la implementación de DWDM, ya que presenta menor atenuación, baja dispersión y bajas pérdidas de inserción [24]; además, debido a que este rango espectral permite el uso de amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifier*), lo que es muy útil para enlaces de transmisión a largas distancias, por lo que DWDM es uno de los sistemas más utilizados para aplicaciones que manejan grandes cantidades de tráfico [25].

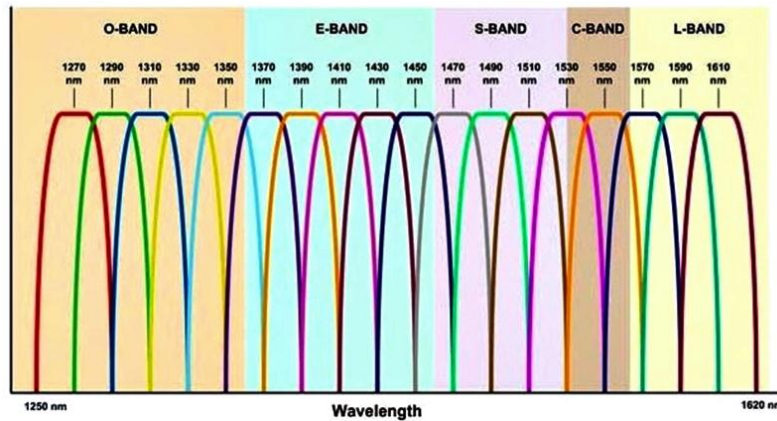


Figura 2.2 Ventanas de operación en redes ópticas. Tomada de [26]

### 2.1.1.2 Multiplexación por División de Longitud de Onda Dispersa (CWDM)

Es un tipo de multiplexación que permite el transporte de varias portadoras ópticas en una misma fibra a un menor costo que el sistema DWDM, sin embargo, con una capacidad menor, por lo cual ya no es utilizada en la implementación de redes ópticas. CWDM utiliza la separación de longitudes de onda de 20nm en un rango de 1270 a 1610nm, de esta manera, puede transportar hasta 18 longitudes de onda y soportar velocidades de canal de hasta 2.5Gbps, para distancias no superiores a los 80 km, por un medio óptico monomodo como lo indica la recomendación de la ITU-T G.652 [27].

## 2.2 COMPONENTES DE UN SISTEMA WDM

En las redes WDM, cada nodo está equipado con transmisores y receptores ópticos que se comunican por medio de cables de fibra óptica, además de otros elementos.

En la Figura 2.3 se presentan los componentes básicos de las redes WDM, los cuales se explican en las siguientes secciones.

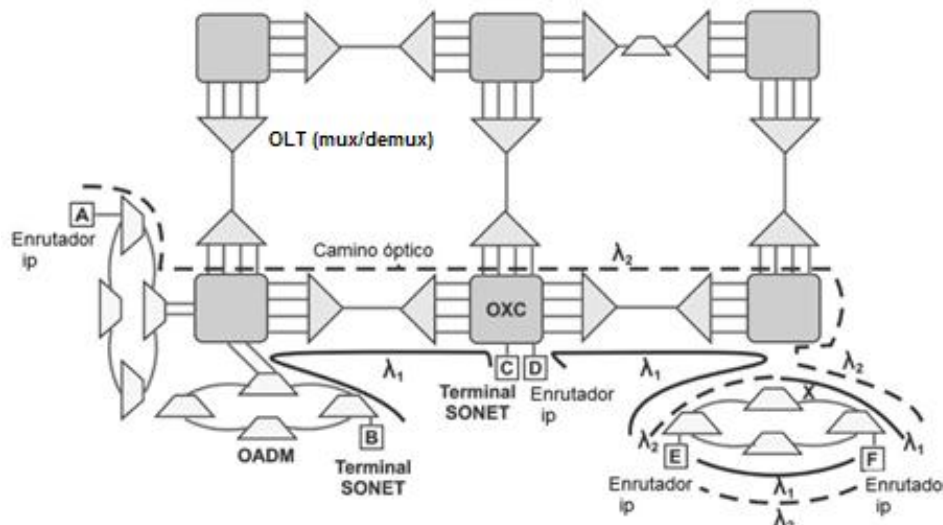


Figura 2.3 Arquitectura de red WDM. Adaptada de [28]



### 2.2.1 Terminales de línea óptica (OLT, *Optical Line Terminal*)

Se encargan de finalizar una conexión punto a punto para multiplexar o demultiplexar las longitudes de onda que conforman los caminos ópticos. También se encargan de la adaptación de las señales de la capa cliente a la capa óptica y viceversa [28]. La capa cliente está conformada por las redes externas, las cuales pueden ser IP, SONET (*Synchronous Optical Network*), SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*), ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), etc.

### 2.2.2 Amplificadores ópticos

A pesar de que la fibra óptica tiene bajas pérdidas para distancias extremadamente largas, se necesitan amplificadores para aumentar el nivel de la señal y garantizar su llegada al destino [29]. Un amplificador de fibra estándar consta de fibra dopada con erbio bombeada por un láser (EDFA), la cual amplifica la señal óptica sin necesidad de hacer conversión al dominio eléctrico [30].

### 2.2.3 Multiplexores de Inserción/extracción de canales ópticos (OADM, *Optical Add/Drop Multiplexers*)

Toman una señal WDM de su puerto de entrada extrayendo de forma selectiva algunas longitudes de onda hacia sus puertos locales dejando pasar el resto intacto al puerto de salida, reduciendo así los costos de operación de la red. Al mismo tiempo puede inyectar selectivamente longitudes de onda desde sus puertos locales hacia el puerto de salida. Los OADM permiten la realización de conmutación de circuitos o conmutación de conexiones punto a punto en el dominio óptico, pero su mayor utilización y eficacia se encuentra en la formación de arquitecturas de anillos WDM ópticos para redes de área metropolitana [28].

### 2.2.4 Conmutadores Ópticos

Los conmutadores ópticos (OXC, *Optical Cross-Connect*) son dispositivos completamente ópticos con un gran número de puertos, donde se pueden interconectar señales ópticas entre múltiples entradas y múltiples salidas. Este sistema permite la conmutación y enrutamiento en redes DWDM y en redes totalmente ópticas (AON, *All Optical Network*) [30]. La función principal de este sistema es conectar o cambiar cualquier canal (longitud de onda), a partir de un puerto de entrada a un puerto de salida.

Los OXC están desplegados masivamente y proporcionan la función de adaptar el tráfico para llenar de una manera eficiente los puertos de salida. Para lograr esto, los sistemas OXC tienen las siguientes funciones [31]:

- Conmutación de fibra: es la capacidad de encaminar las longitudes de onda de una fibra entrante a una fibra saliente distinta, también conocida como conmutación de tipo espacial.
- Conmutación de longitud de onda: es la capacidad de conmutar las longitudes de onda en una fibra entrante a múltiples fibras salientes (Multiplexación o demultiplexación).

- Conversión de longitud de onda: es la capacidad de tomar las longitudes de onda de entrada y convertirlas en otra longitud de onda en el puerto de salida.

En la Figura 2.4, se puede observar las tres funcionalidades de un OXC.

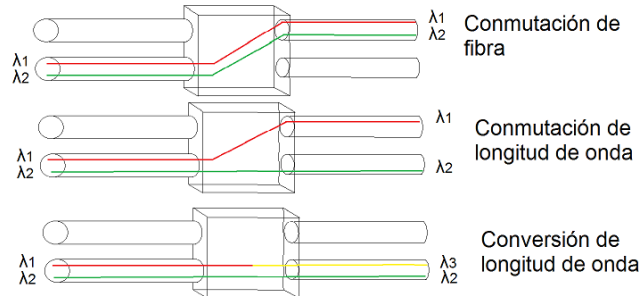


Figura 2.4 Funcionalidades de un OXC. Adaptado de [31]

## 2.3 TÉCNICAS DE CONMUTACIÓN EN REDES ÓPTICAS

La conmutación se considera como la técnica que permite establecer una ruta o camino entre dos nodos (origen - destino) de una red. Este proceso se puede realizar de forma eléctrica y óptica; a nivel eléctrico, la conmutación es la causante de introducir mayor retardo en la red, debido a los procedimientos necesarios para el envío de la información y al tráfico de la red [32]. Luego de analizar la evolución de las redes ópticas, se pone de manifiesto la importancia de llevar a cabo este proceso al dominio óptico, para lo cual se proponen diferentes técnicas de conmutación.

En redes ópticas se definen tres técnicas de conmutación: Conmutación Óptica de Circuitos (OCS, *Optical Circuit Switching*), Conmutación Óptica de Paquetes (OPS, *Optical Packet Switching*) y Conmutación Óptica de Ráfagas (OBS, *Optical Burst Switching*), las cuales se describen con más detalle a continuación, haciendo énfasis en la técnica OBS, tema central de este trabajo de grado.

### 2.3.1 Conmutación Óptica de Circuitos (OCS)

Es una técnica de conmutación la cual consiste en reservar un camino óptico (*Lighpath*) entre dos nodos de una red, siendo ese camino una longitud de onda dedicada (fuera de la banda de los canales de datos), este tipo de conmutación tiene un bajo nivel de escalabilidad, ya que el número de longitudes de onda que se pueden transportar en una fibra es limitado [33]; además, toda la información que es transmitida se somete a conversiones eléctrico-óptico y óptico-eléctrico en los nodos de ingreso y destino, lo que incrementa los retardos en la red. Esta tecnología se caracteriza por ser orientada a conexión, es decir, necesita de un establecimiento previo del *lighpath* para poder transmitir y de la misma manera una vez termine la transmisión de información se hace necesario liberar el enlace para que otros nodos puedan transmitir la información, lo que causa un uso ineficiente del ancho de banda [34].



### 2.3.2 Conmutación Óptica de Paquetes (OPS)

OPS es una técnica basada en la conversión inicial de los paquetes electrónicos al dominio óptico, para ser transportados por la red sin ningún tipo de conversión entre los extremos, el encaminamiento se realiza en el dominio óptico [33].

En OPS la información es segmentada en paquetes, cada paquete se envía junto con su respectivo paquete de control (cabecera), en este se transporta toda la información de configuración para el proceso de conmutación de los paquetes en cada nodo. Este tipo de conmutación proporciona una gran ventaja en cuanto a flexibilidad y tratamiento de los recursos ópticos, puesto que los canales para el transporte de la información se hace de manera dinámica al igual que el establecimiento de caminos ópticos [19] [35] [36]. Sin embargo, esta técnica también plantea algunos problemas que hacen de su implementación algo realmente complejo:

- El primer problema reside en los conmutadores, ya que no pueden realizar todavía un procesamiento óptico, por lo que es necesario pasar la cabecera al dominio eléctrico y tomar electrónicamente las decisiones oportunas de encaminamiento [34].
- Otro problema es el almacenamiento de un paquete que está esperando a ser conmutado, ya sea porque su cabecera se está procesando o porque en ese momento otro paquete está usando esa misma interfaz de salida, y actualmente no se cuenta con sistemas de almacenamiento óptico [34].
- Finalmente, el paquete de información debe estar altamente sincronizado con su cabecera, lo que aumenta la complejidad de implementación [34].

### 2.3.3 Conmutación Óptica de Ráfagas (OBS)

Es un tipo de híbrido entre OCS y OPS, en otras palabras, OBS combina lo mejor de la conmutación de paquetes y lo mejor de la conmutación de circuitos a la vez que evita sus defectos. En OBS, la unidad de transporte es la ráfaga, que consiste en un conjunto de paquetes, a la cual se le asigna un paquete de control. En el nodo origen, inicialmente el paquete de control se envía por un camino diferente al que se envían los canales de datos, con un tiempo de separación entre ellos, con el fin de que el paquete de control tenga el tiempo necesario para configurar el nodo correspondiente y de esa manera establecer la interfaz de salida para la ráfaga hacia el siguiente nodo destino, como resultado se obtendrá un retardo extremo a extremo muy pequeño generado por el procesamiento del paquete de control electrónicamente en cada nodo de la ruta hace el nodo destino, lo que no ocurre en OCS donde el retardo extremo a extremo de la red es alto [37].

En la Tabla 2.2 se muestra las principales ventajas y desventajas de cada técnica de conmutación con relación al uso del ancho de banda, latencia, tolerancia ante fallos y dificultad de implementación. Cabe notar que OBS intenta obtener las ventajas de las otras dos técnicas de conmutación (OCS y OPS), tratando de minimizar las desventajas de las mismas.



Tabla 2.2 Comparación entre sistemas de conmutación óptico [38] [37].

Conmutación Óptica	Aprovechamiento de Ancho de Banda	Latencia	Búfer Óptico	Tolerancia a fallos	Dificultad en implementación
OCS	Bajo	Alta	No requiere	Baja	Bajo
OPS	Alto	Baja	Requiere	Alta	Alto
OBS	Medio	Baja	No requiere	Media	Medio

Por tratarse del tema de investigación de este trabajo de grado, a este ítem se dedicará un capítulo más adelante (Capítulo 3) en el cual se busca hacer un análisis a cada uno de los elementos que conforman una red OBS, centrándose en los procesos de enrutamiento y asignación de recursos.

## 2.4 GENERALIDADES DE REDES ÓPTICAS ELÁSTICAS (FLEXGRID)

El tráfico de Internet en la red mundial casi se ha duplicado cada dos años, y se espera para el año 2020 un incremento del 22 % respecto del año 2015 como puede verse en la Tabla 2.3 [39]. Este importante aumento en el tráfico, se debe a varios factores tales como: aumento en el número de usuarios móviles y de Internet, velocidades de datos más altas, la expansión de las redes Wi-Fi y el crecimiento en el número de demandas en servicios de telecomunicaciones como computación en la nube (*Cloud computing*), Televisión sobre IP (IPTV, *Internet Protocol Television*), *Streaming*, vídeo en tiempo real y en alta definición, entre otros [40]; lo que conlleva a brindar mayor ancho de banda a los usuarios finales. Este hecho, junto con el aumento continuo de demanda de tráfico en la red, es de gran preocupación, debido a que no se dispone de una red dinámica y flexible, capaz de adaptarse a los cambios en el flujo de datos y que ofrezca un rendimiento alto de los medios desplegados.

Recientemente, investigadores del sector, han ideado un nuevo enfoque para la evolución de las redes basadas en la Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*) sobre rejilla fija hacia una nueva rejilla flexible. Dicho enfoque ha sido denominado Flexgrid o redes ópticas elásticas (EONs, *Elastic Optical Networks*), buscando mayores velocidades de datos, menor consumo energético y mayor flexibilidad en la asignación espectral [3].

Tabla 2.3 Expectativa de Tráfico global IP, 2015-2020. Tomada de [39].

IP Traffic, 2015–2020							
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	CAGR (2015–2020)
<b>By Type (Petabytes [PB] per Month)</b>							
Fixed Internet	49,494	60,160	73,300	89,012	108,102	130,758	21%
Managed IP	19,342	22,378	25,303	28,155	30,750	33,052	11%
Mobile data	3,685	6,180	9,931	14,934	21,708	30,564	53%
Total IP traffic	72,521	88,719	108,533	132,101	160,561	194,374	22%



### 2.4.1 Definición de Redes Ópticas Elásticas

Una red óptica elástica, se define como una red de transporte óptico (OTN, *Optical Transport Network*), que tiene la capacidad de adaptar el espectro asignado de las conexiones ópticas a los requerimientos de ancho de banda del tráfico transportado. Mientras que en las redes ópticas rígidas (como las actualmente utilizadas, redes WDM), cada conexión óptica ocupa la misma cantidad de espectro durante el tiempo de duración de la conexión; esto conlleva a que estas redes rígidas agrupen mucho tráfico en conexiones ópticas de gran ancho de banda, para así no desaprovechar recursos de capacidad. Por otro lado, las redes ópticas elásticas permiten una mayor versatilidad y adaptabilidad, con el fin de obtener un mejor aprovechamiento de los recursos ópticos [10].

El primer cambio de las Redes Ópticas Elásticas (EONs), respecto de las actuales redes ópticas (WDM), es la sustitución de una rejilla fija por una flexible [3]. Las redes WDM trabajan sobre una rejilla fija, especificada por la ITU-T en el estándar G.694.1 (DWDM), el cual define el espaciamiento entre canales que abarcan desde 25 GHz hasta 100 GHz (25, 50 y 100 GHz) como lo muestra la Figura 2.5.

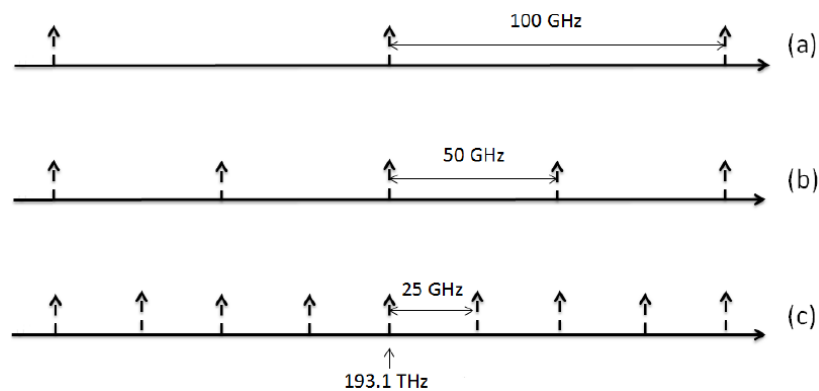


Figura 2.5 Plan de frecuencias ITU-T G.694.1. Adaptada de [8].

Actualmente, la ITU-T trabaja en la revisión del estándar G.694.1, específicamente en la división del espectro óptico de manera flexible denominado Flexgrid. En este, el espectro óptico de la banda C (1530–1565 nm) es dividido en segmentos de frecuencia de 6.25 GHz, dos segmentos conforman un slot de 12.5 GHz y se asigna una frecuencia central (CF, *Central Frequency*) a cada canal, que debe coincidir con el principio o el final de estos segmentos [3]. Teniendo en cuenta lo anterior, las frecuencias (en THz) permitidas para espaciamientos de canales de 6.25 GHz en una fibra, tomando como referencia la frecuencia de 193.1 THz (1552.5244 nm), están dadas por la ecuación (2.1):

$$\text{Frecuencias permitidas} = 193.1 + n \cdot 0.00625 \quad (2.1)$$

Donde  $n$  es entero positivo o negativo (incluido el 0), el cual tiene un valor mínimo de -246 (índice de la frecuencia correspondiente a 1565 nm) y máximo de 455 (índice de la frecuencia correspondiente a 1530 nm), que representa el índice de la frecuencia final de cada segmento.



El segundo cambio, es la inclusión del concepto de ancho de ranura (SW, *Slot Width*) [3], el cual es igual al número de segmentos o intervalos de frecuencia (FSs, *Frequency Slots*) asignados a la conexión, multiplicado por 12.5 (tamaño de un slot en GHz). Por lo anterior, el ancho de ranura se puede expresar mediante la ecuación (2.2):

$$\text{Slot Width} = 12.5 \text{ GHz} \cdot m \quad (2.2)$$

Donde  $m$  es un número entero positivo, y representa el número de slots de frecuencia necesarios para cumplir con el ancho de banda requerido.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, un canal es definido por su frecuencia central y su respectivo ancho de banda que corresponde a la diferencia entre su frecuencia final e inicial. De esa manera, es posible hallar la frecuencia central de un canal asociado a una conexión óptica mediante la ecuación (2.3):

$$\text{frecuencia central} = f_i + 0.00625 \cdot m \quad (2.3)$$

Donde  $f_i$  es la frecuencia inicial del canal en THz.

En la Figura 2.6, se muestra un ejemplo en el cual se tienen dos conexiones ópticas (connection 1 y connection 2), con diferentes requerimientos de ancho de banda, sus respectivos valores de la frecuencia central y el ancho de ranura.

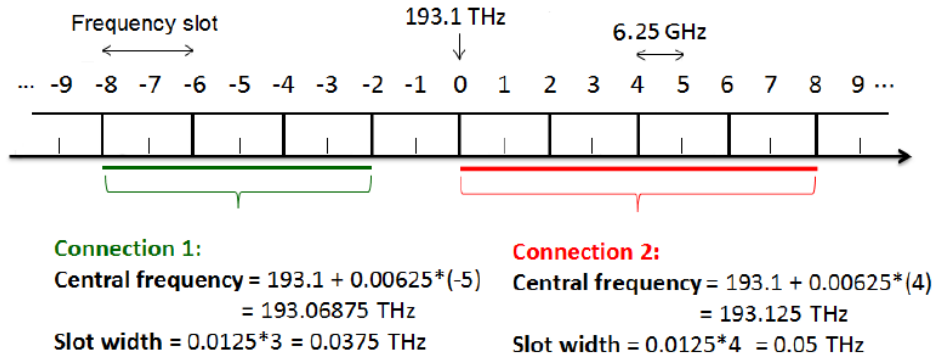


Figura 2.6 Concepto de Frequency slot. Adaptado de [8].

Como se observa en la Figura 2.6, el ancho de banda óptico disponible se divide en unidades de espectro o slots de 12.5 GHz; por ejemplo, los anchos de banda ópticos de 37.5 GHz (connection 1) y 50 GHz (connection 2) corresponden a 3 y 4 *Frequency slots* respectivamente. Con estos dos conceptos (frecuencia central y ancho de ranura), es posible definir un canal en función de los valores de  $m$  y  $n$ . En la Figura 2.7, se observa un ejemplo de asignación de canales en las tecnologías WDM (para una rejilla fija de 50 GHz) y Flexgrid (rejilla flexible) para diferentes valores de  $m$ .

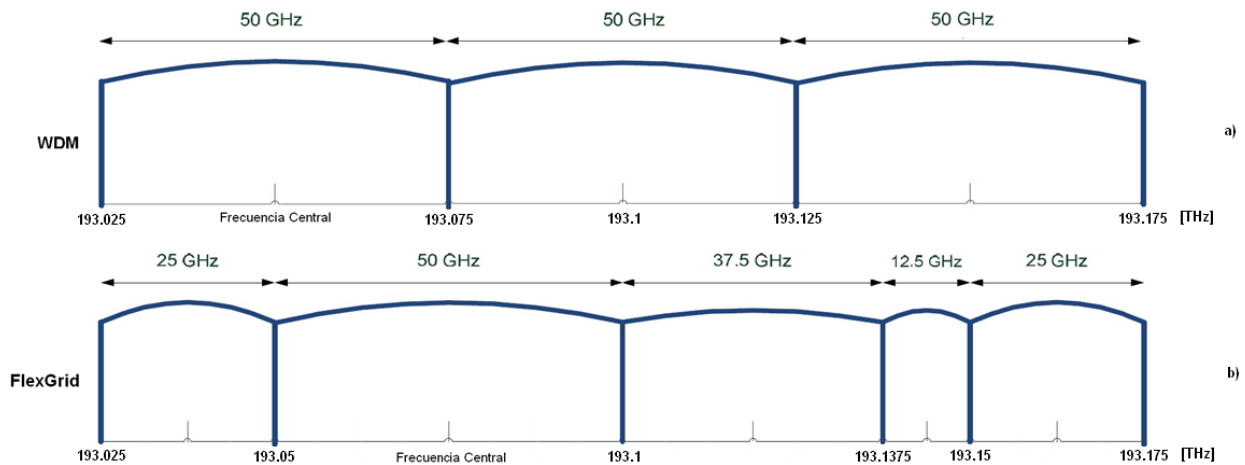


Figura 2.7 Ejemplo asignación de canales en (a) rejilla fija de 50 GHz (WDM) (b) rejilla flexible (Flexgrid). Adaptada de [3].

## 2.4.2 Características de las Redes Ópticas Elásticas

Las redes ópticas elásticas (EONs) emplean una rejilla espectral flexible, con ancho espectral variable por canal según la demanda de ancho de banda, permitiendo mayor eficiencia en el uso del espectro. Este tipo de redes se basan en la tecnología Flexgrid, que permite el empleo de subportadoras de tamaño fijo, dando lugar a anchos de banda variables, así como a gran flexibilidad respecto a los formatos de modulación [9]. A continuación se mencionan las principales características de una red óptica elástica:

- **Capacidad para ajustar el ancho de banda de manera dinámica**

Las redes ópticas actuales basadas en WDM estandarizadas por la ITU-T, no permiten la transmisión de tasas superiores a los 100 Gbps en cada uno de sus canales debido a que los dispositivos de la red operan sobre rejillas de espectro fijo (separación de 50 GHz) [41], lo que se convierte en un problema significativo en el desarrollo de canales de alta capacidad (del orden de los Terabits) y además que genera un uso ineficiente del espectro, ya que en muchas ocasiones el ancho de banda ocupado por una conexión eléctrica transmitida por una conexión óptica o *lightpath* es mucho menor que su capacidad, por lo cual habrá un espacio restante que no es utilizado, de manera que se desaprovecha parte del espectro [9]. En contraposición, las redes ópticas elásticas permiten dividir el espectro de manera flexible (división del espectro disponible con una granularidad más baja que en las redes ópticas actuales (WDM) por ejemplo 6.25 GHz, permitiendo obtener anchos de banda variables) y asignar solo la cantidad de espectro necesario para las demandas de los usuarios en función de la velocidad de datos y la distancia de transmisión [9]. Para lograr este objetivo, se han realizado diferentes investigaciones en la búsqueda de nuevos formatos de modulación y tecnologías de asignación de espectro (nivel físico).

Respecto a los formatos de modulación, se destacan las investigaciones en cuanto a la Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), Nyquist WDM (N-WDM) y la Generación de la forma de onda arbitraria óptica dinámica (OAWG, *Dynamic Optical Arbitrary Waveform Generation*). Cabe resaltar que los estudios se han realizado con mayor énfasis en la modulación

OFDM, la cual permite transmitir canales de gran capacidad en subportadoras ortogonales de menor tasa binaria, permitiendo ajustar el ancho de banda (y de la tasa binaria total) mediante el ajuste del número de subportadoras.

Por otro lado, entre las tecnologías que se están estudiando para el desarrollo de redes ópticas elásticas, la que proporciona un mejor balance entre rendimiento y complejidad tecnológica es la tecnología Flexgrid, en la cual, el espectro óptico disponible es dividido en segmentos (Slots) de mayor granularidad que en las redes WDM, lo que permite asignar la cantidad de espectro justo dependiendo de los requerimientos de ancho de banda del usuario. La Figura 2.8, muestra la diferencia en la asignación del espectro entre las tecnologías Flexgrid (flexible) y WDM (rígido).

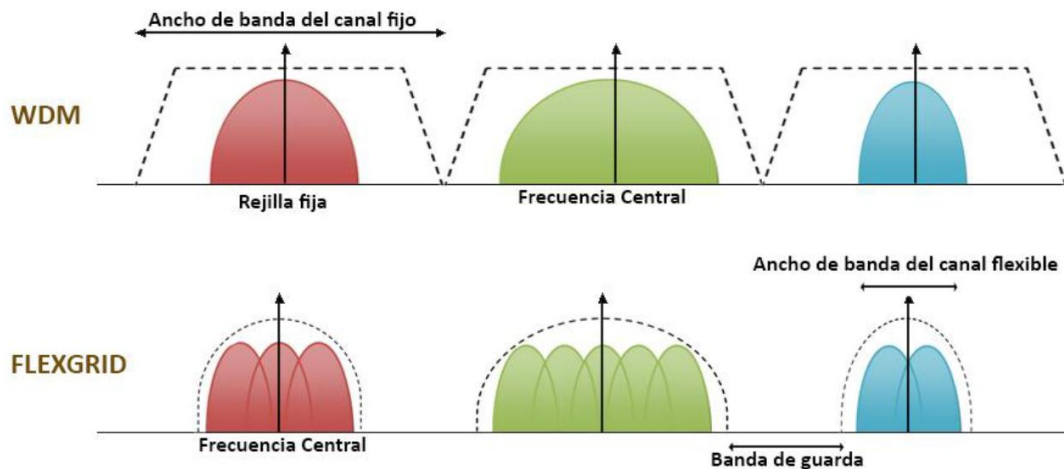


Figura 2.8 Asignación de espectro mediante WDM vs FlexGrid. Tomada de [9].

Como se observa en la Figura 2.8, en la tecnología WDM el ancho de banda asignado a una conexión óptica es fijo (rejilla espectral fija de 50 GHz), mientras que en la tecnología Flexgrid, se utilizan subportadoras de tamaño fijo que se solapan y de esa manera lograr que el ancho de banda total sea variable (dentro del espectro disponible), adaptándose así a los requerimientos del servicio.

- **Permiten tasas de bit variables.**

Para cumplir con este objetivo, es necesario el uso de transpondedores (equipos transmisores y receptores ópticos) flexibles, es decir que no se pueden usar los utilizados hasta el momento (transpondedores usados en WDM) sino transpondedores elásticos que soporten este tipo de redes (EONs). Estos transpondedores se caracterizan por tener diferentes grados de flexibilidad respecto a los formatos de modulación, velocidad de bits y número de subportadoras que conforman el canal.

- **Uso de distintos formatos de modulación de acuerdo con los requerimientos de cada conexión.**

Las redes ópticas flexibles, deben ser capaces de transmitir canales tanto de baja como de alta capacidad (por ejemplo VoIP y Video bajo demanda respectivamente), por tal razón es indispensable contar con diversos formatos de modulación, que se adapten a los

requerimientos de cada conexión tales como el ancho de banda requerido y la distancia de transmisión.

### 2.4.3 Sistemas de transmisión para Redes Ópticas Elástica.

Las redes ópticas elásticas tienen como motivación tanto la transmisión eficiente de canales de baja capacidad (10/40 Gbps), como la transmisión de señales de mayor capacidad en el futuro (100/400 Gbps y 1Tbps) [3]. A continuación se van a presentar distintas tecnologías de transmisión, que permiten por sus características, la implementación mediante ellas del concepto de red elástica.

#### 2.4.3.1 OFDM

La Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), es una tecnología de modulación basada en la transmisión de señales de alta velocidad, mediante la división de la misma en un gran número de subportadoras de menor capacidad. Esta división permite ajustar el ancho de banda de la señal a transmitir, eligiendo únicamente el número de subportadoras que la generan [32].

OFDM se caracteriza por la ortogonalidad de todas las señales que forman el canal a transmitir. Esta propiedad permite concentrar las señales subportadoras en mucho menor ancho espectral que en el caso de WDM, ya que utilizando esta técnica de modulación, el espectro de las subportadoras puede solaparse con el resto, permitiendo la eliminación de bandas de guarda entre las mismas, como se observa en la Figura 2.9.

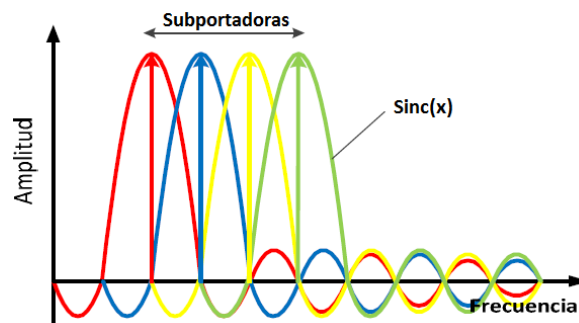


Figura 2.9 Señal OFDM en el dominio de la frecuencia. Adaptada de [32].

#### 2.4.3.2 Nyquist WDM

Otra técnica que se puede utilizar para la transmisión de múltiples canales es la llamada Nyquist WDM (N-WDM), la cual permite conseguir una alta eficiencia espectral. Esta técnica consiste en la concatenación de varios canales WDM; idealmente, este sistema podría alcanzar la máxima eficiencia espectral (1 símbolo/Hz). La Figura 2.10 muestra una señal N-WDM en el dominio del tiempo y la frecuencia.

El inconveniente al implementar este tipo de sistemas, radica en conseguir una señal totalmente rectangular en el dominio de la frecuencia, por lo que esta tecnología no es muy viable en la implementación de redes ópticas elásticas y por consiguiente los estudios de investigación se han centrado en la tecnología basada en OFDM [3].

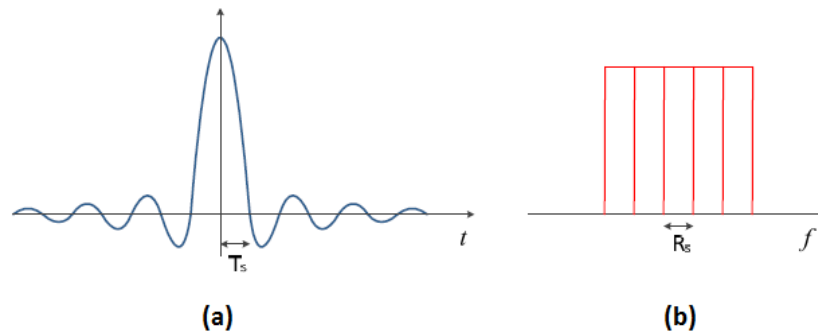


Figura 2.10 Respuesta en frecuencia (a) y en el tiempo (b) de una señal N-WDM. Tomada de [3].

#### 2.4.4 Arquitecturas Red Óptica Elástica

Para que las redes ópticas puedan dar soporte a la cantidad de tráfico que circule por las redes en el futuro, deberán ser flexibles en el uso del espectro. Además, se espera que las redes ópticas del futuro también tengan características como alta eficiencia en el uso de los recursos, implementación a bajo costo y un bajo consumo de potencia. Debido a esto, se han propuesto varias arquitecturas que se definirán a continuación.

##### 2.4.4.1 Red Óptica Elástica con espectro ranurado SLICE

Es una arquitectura de red óptica basada en la Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM), a la cual se le puede adaptar el ancho de banda requerido en función del número de subportadoras, debido a la flexibilidad en el uso del espectro de este tipo de redes.

Una de las características de la arquitectura SLICE, es asignar el espectro disponible de manera flexible a una conexión óptica extremo a extremo; la asignación se realiza de acuerdo con el volumen de tráfico o petición del usuario. Además, el ancho de banda para una conexión óptica en SLICE se expande y se contrae de acuerdo con el volumen de tráfico y los requerimientos del usuario, si es necesario [42].

En la Figura 2.11 se observa como se lleva a cabo la asignación de recursos espectrales en una conexión óptica elástica con espectro ranurado (SLICE), y hace una comparación respecto a la forma como se hace en las redes ópticas rígidas (WDM), en las cuales se asigna toda la capacidad del canal a una conexión entre un par de nodos terminales, mientras que a una conexión de red óptica elástica con espectro ranurado, se aplica los conceptos de segmentación y agregación para asignar la cantidad justa de espectro requerido [42].

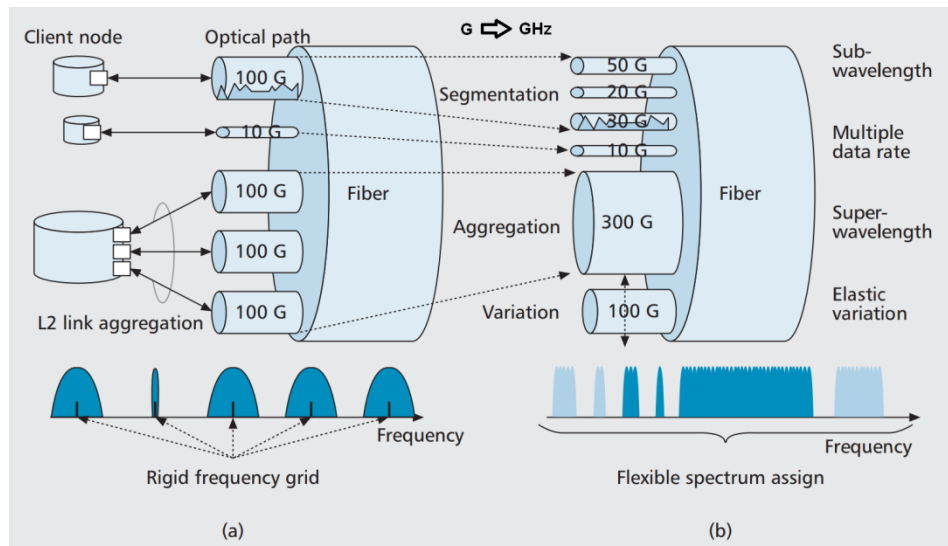


Figura 2.11 Arquitectura de una Red Óptica Elástica (EON) (2). Tomada de [42].

Como se observa en la Figura 2.11 (a), un usuario final (*Client node*) tiene a disposición un canal con un ancho de banda de 100 GHz para establecer una conexión óptica con otro usuario, pero el servicio requiere menos de la tercera parte del ancho de banda del canal (30 GHz) para transmitirse; en este caso, se asignará los 100 GHz y de esta manera se está desaprovechando gran parte de espectro. Por otro lado, una red óptica elástica con espectro ranurado (SLICE), utiliza el concepto de segmentación (generar un sub-canal o sub-wavelength) para dividir el espectro disponible en porciones, con el fin de asignar solamente lo necesario a la conexión óptica entre un par de nodos terminales y de esta manera aprovechar de mejor forma el espectro, como se puede ver en la Figura 2.11 (b).

De igual manera, cuando un usuario requiere de un canal con ancho de banda de 300 GHz para establecer una conexión óptica (ver Figura 2.11 (a)); en una red rígida, se tendrá que asignar 3 canales de 100 GHz; mientras que una red óptica elástica basada en la arquitectura SLICE, se aplica el concepto de agregación (generar un super canal o super-wavelength), con el fin de asignar un solo canal con gran ancho de banda (300 GHz) y así reducir la complejidad del sistema como se puede observar en la Figura 2.11 (b).

La Figura 2.12, muestra la arquitectura de una Red Óptica Elástica de espectro ranurado (SLICE). Este tipo de redes consta de transpondedores de ancho de banda variable (BVT, *Bandwidth Variable Transponders*) en el borde de la red (Nodo de borde) y conmutadores ópticos cruzados de ancho de banda variable (BV-WXCs, *Bandwidth-Variable Wavelength Cross Connect*) en el núcleo de la red (Nodo Core). A continuación se estudiarán con más detalle cada uno de los componentes.

- **Transpondedor de ancho de banda variable (BVT)**

Con el fin de lograr una alta utilización de recursos espectrales en una conexión óptica, el transpondedor de ancho de banda variable genera una señal óptica, usando sólo el recurso espectral necesario para transmitir la señal del cliente y así reducir al mínimo la separación entre conexiones ópticas adyacentes.

- **Conmutador óptico cruzado de ancho de banda variable (BV-WXC)**

El conmutador óptico (BV-WXC) asigna una conexión cruzada con el ancho de banda correspondiente, para crear un camino óptico punto a punto (end to end) de tamaño apropiado. Para ello, el BV-WXC tiene que configurar su ventana de conmutación de manera contigua, de acuerdo al ancho espectral de la señal óptica entrante y de esta manera aumentar o reducir el ancho de banda de la conexión óptica elástica [8] [42].

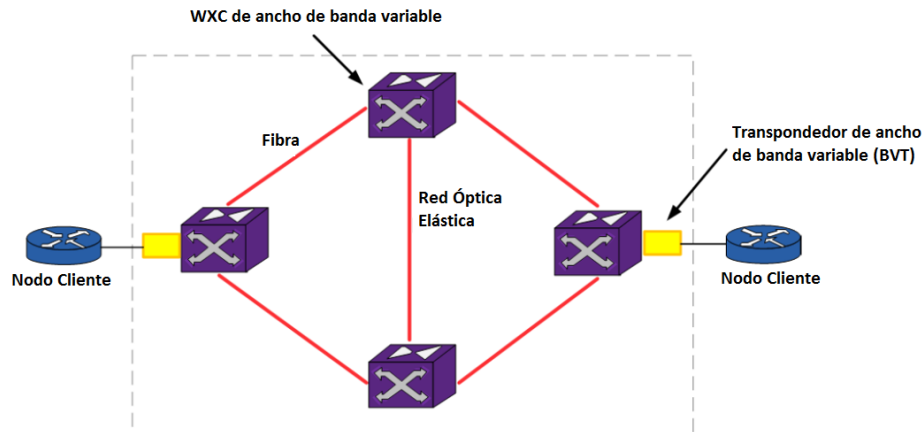


Figura 2.12 Arquitectura de una Red Óptica Elástica (EON) (1). Adaptada de [40].

#### 2.4.4.2 Redes Ópticas Elásticas basadas en FWDM.

Estas redes tienen un concepto similar al de SLICE, permitiendo flexibilidad en la asignación de espectro. FWDM (Flexible WDM) es una tecnología que evoluciona del WDM; al igual que las tecnologías basadas en OFDM (SLICE), permiten la modulación de multipotadoras y necesitan de los conmutadores ópticos en su arquitectura [3]. Además, en esta arquitectura se utiliza la modulación N-WDM (Nyquist WDM), que consiste en el uso de sub-portadoras de espectro casi rectangular, con una frecuencia cercana o igual al límite de Nyquist para que se puedan transferir símbolos libre de interferencias.





## CAPÍTULO 3: ENRUTAMIENTO Y ASIGNACIÓN DE RECURSOS EN REDES OBS

### 3.1 REDES POR CONMUTACIÓN ÓPTICA DE RÁFAGAS (OBS)

Existen diferentes tipos de conmutación óptica, cada uno, con características específicas, en este documento, se analizan las más comunes. En primer lugar, se tiene la conmutación óptica de circuitos (OCS) que propone establecer previamente los recursos de red necesarios para la transmisión de datos entre origen y destino, lo que significa un solo proceso de establecimiento de recursos de red, sin importar el número de nodos, esto significa que OCS tiene un enfoque de transmisión orientado a conexión [43], lo cual representa una ventaja importante ya que OCS no requiere almacenamiento óptico en los nodos intermedios del trayecto óptico [13]. Sin embargo, OCS tiene el inconveniente de transmitir un solo paquete por cada conexión establecida, lo que representa un tamaño de unidad de datos muy pequeña respecto a otros protocolos. En el caso especial de los paquetes IP (*Internet Protocol*), el procedimiento es demasiado complejo por causa de los retardos excesivos que implica el establecimiento de cada conexión por cada paquete [44].

Teniendo en cuenta los problemas que surgen con OCS, se propone la conmutación óptica de paquetes (OPS) como una nueva técnica de conmutación, que trata de suplir las debilidades de OCS, eliminando las capas intermedias y haciendo converger IP directamente sobre la capa óptica [45]. Sin embargo, existe problema con el almacenamiento de los datos en el dominio óptico, ya que OPS es incapaz de realizar un procesamiento completamente óptico, por ello debe acudir al procesamiento electrónico del encabezado del paquete para tomar las decisiones correctas de enrutamiento, lo cual implica tener una sincronización estricta entre la cabecera y la carga útil del paquete, dando como resultado una mayor complejidad en la red [46]. Cabe destacar que a pesar de tener varias ventajas con respecto a OCS, y ser un tema de profunda investigación en las telecomunicaciones, OPS aún no ha sido implementada en la práctica [47].

Debido a las razones anteriormente expuestas y a la necesidad de corregir las falencias de OCS y OPS, surge la conmutación óptica de ráfagas (OBS), el cual es un concepto de conmutación que se encuentra entre la conmutación óptica de circuitos y la conmutación óptica de paquetes. Esta tecnología se basa en evitar la conversión óptica-eléctrica y eléctrica-óptica (O/E/O) en cada nodo de conmutación, ya que son procesos que desperdician la capacidad que tienen la fibra óptica en la transmisión de grandes volúmenes de información y conlleva a la generación de embotellamiento<sup>8</sup> [47].

En OBS, la unidad de transporte básica es la ráfaga (*Burst*), la cual consta de un determinado número de paquetes que generalmente son datagramas IP y a la cual se le asigna un encabezamiento o paquete de control (BCP, *Burst Control Packet*). De esa manera, OBS busca mejorar el rendimiento de la red agregando paquetes que, por ejemplo tengan una dirección de destino común o información de un mismo tipo de servicio en una misma ráfaga, que será conmutada ópticamente en los nodos, realizando

---

<sup>8</sup> El embotellamiento o congestión se presenta cuando a la red se le ofrece más tráfico del que puede transportar.

solamente la conversión óptica-eléctrica en un encabezado común o paquete de control que indicará el destino de conmutación, disminuyendo de esa manera los retardos en la red [11].

### 3.1.1 Arquitectura de Redes OBS

El modelo general de la estructura de una red OBS se muestra en la Figura 3.1, en la cual se destacan sus principales componentes, estos son: Nodos de Frontera o Borde (*Edge Node*) y Nodos de Núcleo o Centrales (*Core Node*), cada uno con funciones específicas. Los Nodos de Frontera pueden ser nodos de ingreso y/o nodos de egreso, en los nodos de ingreso se inicia la transmisión y se realiza el ensamble de las ráfagas; mientras que en los nodos de egreso finaliza la transmisión y ocurre el desensamble de ráfagas. Por otra parte, el nodo central consta de una matriz de conmutación óptica<sup>9</sup>, demultiplexores para los canales de cada fibra de entrada, multiplexores a la salida y una unidad de control que procesa los paquetes de control de la ráfaga [49]. Además, los nodos de borde y de núcleo están unidos mediante enlaces físicos de fibra, utilizando alguna técnica de multiplexación. Así mismo, también se presentan los posibles clientes de estas redes, como pueden ser: redes ATM, SONET, redes IP, entre otros.

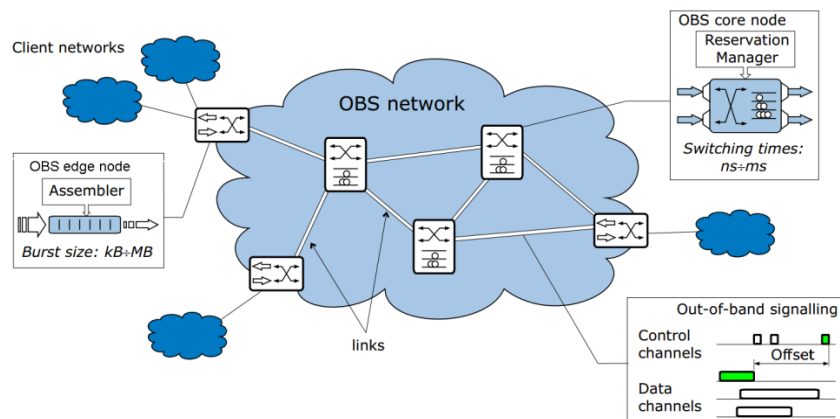


Figura 3.1 Red por Conmutación Óptica de Ráfagas. Adaptada de [50].

Para el caso de redes IP, los datagramas IP son ensamblados en paquetes de mayor tamaño denominados ráfagas. Estas ráfagas son transmitidas después de un paquete de encabezamiento de ráfaga llamado mensaje de configuración o paquete de control (BCP), con un retardo llamado tiempo de compensación (tiempo offset), estos paquetes son transportados en uno o varios canales diferentes a los canales de datos. El tiempo de compensación es el intervalo de tiempo, en el nodo de ingreso, entre el procesamiento del primer bit del mensaje de configuración y la transmisión del primer bit de la carga útil de la ráfaga. Cada paquete de control contiene información de programación y enrutamiento, y es procesado en el dominio electrónico antes del arribo de la ráfaga correspondiente [51]. En OBS, existen dos tipos de canales: los canales de control que llevan los paquetes de control de la ráfaga (mensajes de configuración), y se denomina grupo de canales de control (CCG, *Control Channel Group*); y los canales de datos que llevan la carga útil de la ráfaga y se denomina grupo de canales de ráfaga de datos (BCG, *Data Burst Channel*

<sup>9</sup> Permite conmutar las ráfagas de una fibra óptica de entrada o salida, este elemento es reconfigurable y es controlado automáticamente desde la unidad de control.

Group). De este modo, se asigna dos canales para la transmisión del paquete de control y su correspondiente ráfaga de datos. En la Figura 3.2 se visualiza el envío de la ráfaga, los dos tipos de canales y el tiempo de compensación entre la ráfaga de datos y el paquete de control.

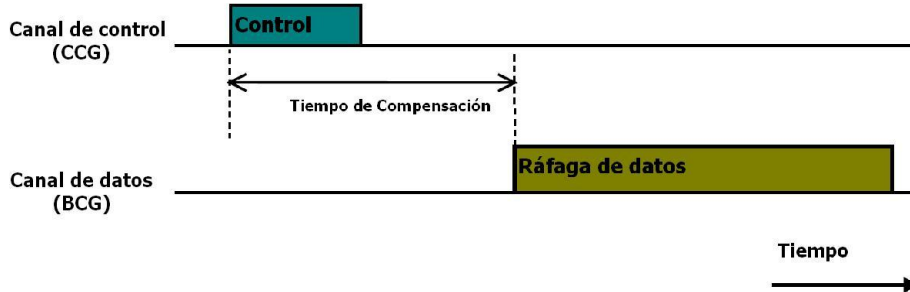


Figura 3.2 Proceso de Envío de una ráfaga en OBS.

Existen dos modos de enviar datos a través de la red. La primera opción es por medio de enrutadores de frontera electrónicos, los cuales brindan interfaces heredadas (por ejemplo, IP, Gigabit Ethernet, SONET) y funcionalidad de ensamble/desensamble de ráfagas. La segunda opción es tener interfaces de sistemas finales directamente con enrutadores OBS a través de tarjetas de interfaz de red. El formato de los datos llevados en las ráfagas no está sujeto a los sistemas OBS. Las ráfagas de datos pueden ser paquetes IP, paquetes Ethernet o cadena de bits sin procesar. El funcionamiento de una red OBS se podría ver de la siguiente forma: antes de la transmisión de la ráfaga de datos en un canal de datos, un encabezado de ráfaga, es enviado en el canal de control, especificando el canal en el cual está siendo transmitida la ráfaga y el destino de la ráfaga. El encabezado de ráfaga también lleva un campo de compensación y de longitud. El campo de compensación define el tiempo entre la transmisión del primer bit del encabezado de la ráfaga, y el primer bit de los datos de la misma ráfaga. El campo de longitud especifica el tiempo de duración de la ráfaga.

En la Figura 3.3 se muestra los nodos de frontera (ingreso y egreso) y el nodo troncal, con sus principales funciones asociadas. Cabe destacar que algunas funciones pueden realizarse en un lugar diferente al mostrado en la misma figura.

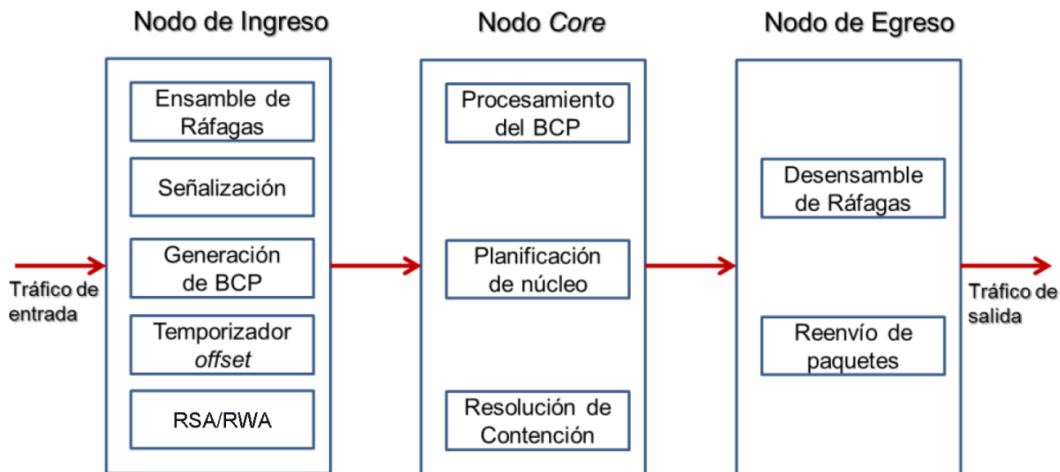


Figura 3.3 Diagrama Funcional de una red OBS. Adaptada de [11].

### 3.1.2 Nodo Frontera OBS

El nodo frontera es el encargado de agregar los paquetes de datos procedentes de redes externas (SDH, SONET, IP, entre otras) e implementa los protocolos de enlace. Una vez un paquete llega al nodo frontera, su cabecera es analizada, y de acuerdo con la red de destino, se decide a cual nodo frontera de la red OBS debe ser enviado [49]. Como se observa en la Figura 3.3, los nodos de frontera llevan a cabo las funciones de ensamble/desensamble de ráfagas, definición y aplicación de los esquemas de señalización, enrutamiento y asignación de recursos (RWA/RSA), la generación del BCP y el cálculo del tiempo offset entre el BCP y la ráfaga de datos, la mayoría de estas funciones se realizan en el dominio electrónico [11].

La arquitectura de un nodo frontera en redes OBS se presenta en la Figura 3.4, en esta se especifica los procesos desde que un paquete ingresa al nodo, se clasifica de acuerdo a algún parámetro o combinación de parámetros (como dirección de destino, tipo de servicio, prioridad, entre otros), se ensambla la ráfaga, se genera el BCP y se calcula el tiempo de offset, se envía el BCP por un canal de control y la ráfaga de datos por alguno de los canales de datos disponibles hacia su nodo frontera destino.

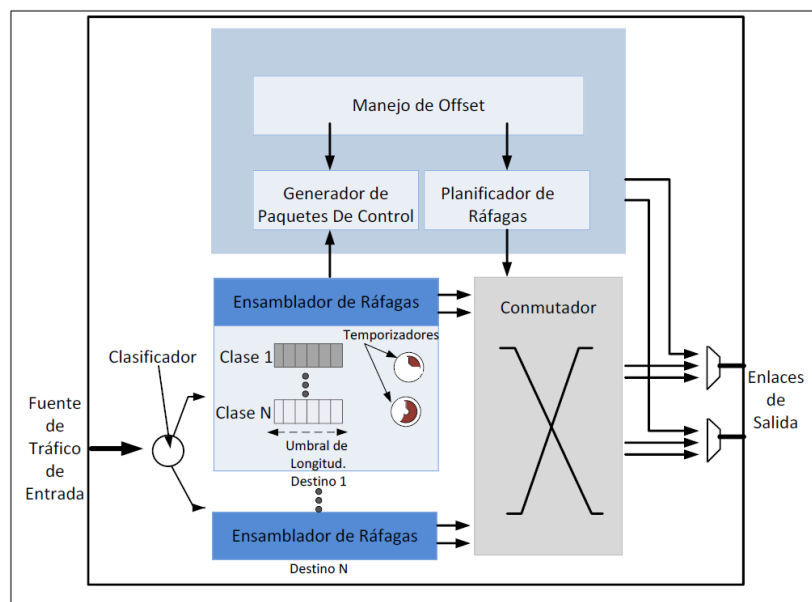


Figura 3.4 Arquitectura Nodo Frontera OBS. Tomado de [49] [11].

#### 3.1.2.1 Ensamble de ráfagas

El ensamblaje de ráfaga es el proceso en el cual se ensamblan el tráfico proveniente de las capas superiores (por ejemplo tráfico IP) en ráfagas en el nodo de frontera de ingreso de la red OBS. Cuando los paquetes llegan de una capa superior, son clasificados y agrupados en búferes electrónicos de acuerdo a criterios de selección como el tipo de tráfico, direcciones de origen o destino, puertos de origen o destino, protocolos sobre IP, tipos de datos, etc. [11] [52]. Luego, el mecanismo de ensamblaje de ráfaga pone estos paquetes en ráfagas de acuerdo a una política de ensamblaje, con ayuda de un algoritmo encargado de indicar el momento en el que se detiene el ensamble y se procede a enviar la ráfaga; los algoritmos encargados de detener el proceso de agregación de paquetes



hacen uso de parámetros como: el tiempo de ensamble, que es utilizado para definir cuándo se debe montar una nueva ráfaga y la longitud mínima y máxima a la que dicha ráfaga puede ser enviada [53]. Hay varias técnicas de ensamblaje de ráfaga adoptadas en la literatura actual de OBS, de las cuales las más comunes son la basada en temporizador (timer-based), basada en longitud de ráfaga umbral (threshold-based) y la mixta o híbrida.

- **Esquema de ensamblado de ráfaga basado en temporizador**

Este esquema define el tiempo máximo para el proceso de ensamblaje de ráfaga, después de la llegada del primer paquete se inicia un temporizador de duración  $T$ , durante el cual son ensamblados todos los paquetes que llegan dentro de este intervalo de tiempo [54]. Este esquema es usado para brindar espacios temporales uniformes entre ráfagas sucesivas desde el nodo de ingreso hasta el núcleo de la red. Aquí la longitud de la ráfaga varía dependiendo de la variación de la carga. Para el caso en el cual, los paquetes tienen restricciones de Calidad de Servicio (QoS, Quality of Service) y limitación de retardo, la solución más apropiada es implementar el esquema basado en temporizador, estos valores de tiempo serán seleccionados con base en los requerimientos de retardo extremo a extremo de los paquetes [45].

- **Esquema de ensamblado de ráfaga basado en umbral de longitud**

Este esquema establece un límite de número de paquetes en cada ráfaga. Por lo tanto, las ráfagas de longitud fija serán generadas en el nodo de frontera de la red OBS. El esquema de ráfagas basado en umbral de longitud no generará ráfagas en intervalos periódicos de tiempo. Este esquema es apropiado si no existe restricciones de retardo, ya que las ráfagas de longitud fija reducen las pérdidas en la red debido a las contenciones de ráfagas en la red (la varianza en la longitud de la ráfaga es cero) [47].

- **Esquema de ensamblado de ráfaga híbrido**

Los dos algoritmos básicos de ensamble de ráfagas en OBS explicados anteriormente presentan falencias si se implementan de manera independiente. El algoritmo basado en longitud, usa el número de paquetes como umbral para la generación (creación) de la ráfaga y es simple de implementar, sin embargo, a bajas cargas de paquetes la red experimenta un alto retardo extremo a extremo (*end to end delay*), mientras que a altas cargas de paquetes, muchas ráfagas de tamaño fijo son inyectadas a la red. Del mismo modo, el algoritmo basado en temporizador, generará ráfagas de tamaño medio-bajo para cargas bajas, mientras que a cargas altas se generarán grandes ráfagas de tamaño variable. Según lo expuesto anteriormente, a cargas bajas de paquetes, ambos algoritmos incrementarán la probabilidad de bloqueo de ráfagas en el nodo central. Por lo tanto, para abordar las limitaciones de los algoritmos basados en tiempo y longitud, la literatura propone un algoritmo híbrido, el cual es una combinación de ambas técnicas con el fin de aprovechar las ventajas de cada una de ellas.

En el algoritmo híbrido, se usan ambos umbrales, y la ráfaga quedará constituida cuando uno de los dos parámetros supere su umbral. Al usar ambos esquemas, la generación de ráfagas es más flexible que si se utilizara solo uno. Calculando el valor óptimo de longitud umbral de ráfaga y la longitud mínima de ráfaga, y usando un valor de tiempo de espera basado en la tolerancia de retardo del paquete, se puede asegurar que se tenga pérdidas mínimas mientras se satisface los requerimientos de retardo.



El esquema basado en temporizador y el esquema basado en longitud de ráfaga umbral son similares a una tasa de llegada de datos constante, un valor de tamaño umbral de longitud de ráfaga puede ser mapeado a un valor de tiempo de espera y viceversa, dando como resultado ráfagas de igual longitud para cada caso.

Según lo anteriormente expuesto, el algoritmo más adecuado para en el ensamble de ráfagas en una red OBS es el híbrido o mixto y es el que se implementa en este trabajo de grado.

### 3.1.2.2 Señalización

Otra de las funciones del nodo frontera es la configuración de mecanismos de conexión, es decir, el establecimiento de la comunicación en una red OBS entre dos nodos frontera a través de nodos centrales, proceso en el cual se determina el funcionamiento de la red y se asignan los recursos de red requeridos para la transmisión de la ráfaga, este proceso se lleva a cabo utilizando un canal dedicado (diferente de los canales de datos) [55] [56].

En varios estudios sobre redes OBS se emplean dos tipos de señalización: distribuida y centralizada. En la primera, la reserva se realiza nodo a nodo; en la segunda será un elemento central con conocimiento de toda la red el que se encarga de enviar las solicitudes de reservas de recursos a los nodos involucrados. En este trabajo de grado se usa la señalización distribuida.

En la literatura se encuentran tres tipos de protocolos para la señalización en redes OBS, estos son: IBT (*In Band Terminator*), TAG (*Tell And Go*) y RFD (*Reserve a Fixed Duration*) [53], los cuales se explicaran con mayor detalle en la sección 3.1.4.

### 3.1.2.3 Planificación

En una red OBS, cuando un nodo intermedio recibe el paquete de control, este decide qué canal debería ser reservado para la ráfaga, proceso que realiza el planificador.

El planificador analiza la información contenida en el paquete de control de ráfaga (BCP), permitiendo determinar el tiempo de llegada y la duración de la ráfaga correspondiente. De esa manera, es posible determinar si el nodo dispondrá de suficiente tiempo para reconfigurar su matriz de conmutación óptica antes de la llegada de la ráfaga. En caso afirmativo, se calcula el instante inicial de la reserva de recursos y la duración de la ráfaga determina el instante final de la reserva de recursos. Esto se realiza por medio de algoritmos de planificación, los cuales se describen en la sección 3.1.5.

### 3.1.3 Nodo Central OBS

Los nodos centrales se encuentran en el núcleo de la red OBS, y permiten la conmutación de ráfagas de datos de manera transparente sobre la fibra óptica mediante la configuración de la matriz de conmutación del equipo para que la ráfaga salga por el puerto adecuado, su arquitectura se muestra en la Figura 3.5.

Un nodo central OBS está compuesto por los siguientes módulos: una interfaz de entrada, un controlador de conmutación electrónica, un núcleo de conmutación óptica y una interfaz de salida.

La función principal de la interfaz de entrada es la extracción de los canales de control y de datos. Cada canal de control es conectado a un receptor de modo ráfaga. Este recupera la información de control, la convierte al dominio eléctrico y la pasa al controlador de conmutación. Simultáneamente, las ráfagas de datos llevadas sobre diferentes canales son demultiplexadas y entregadas al núcleo de conmutación óptica. Algunas arquitecturas OBS poseen un elemento de fibra de carbono introducido en el trayecto de los datos llamada línea de retardo de fibra (FDL, Fiber Delay Line), la cual da un tiempo de compensación para el procesamiento del paquete de control.

Por otro lado, el controlador de conmutación se encarga de procesar los paquetes de control. En particular, realiza una tabla de búsqueda de envío, y reserva recursos de transmisión para la siguiente carga útil de datos.

De igual forma, el núcleo de conmutación óptico está construido por una matriz de conmutación y otros componentes dedicados. La matriz de conmutación puede ser caracterizada por su modo de operación (síncrono/ asíncrono), dimensión, tiempo de conmutación, propiedades de bloqueo interno y degradación de la señal. La dimensión de la matriz de conmutación debería ser  $(N \times C)$   $(N \times C)$ , si  $N$  es el número de puertos de entrada/salida, y  $C$  es el número de canales por puerto (enlace).

Finalmente, la interfaz de salida implementa una actualización de la información de control, multiplexación de canales de datos y de control, y condiciones para la salida de la señal óptica.

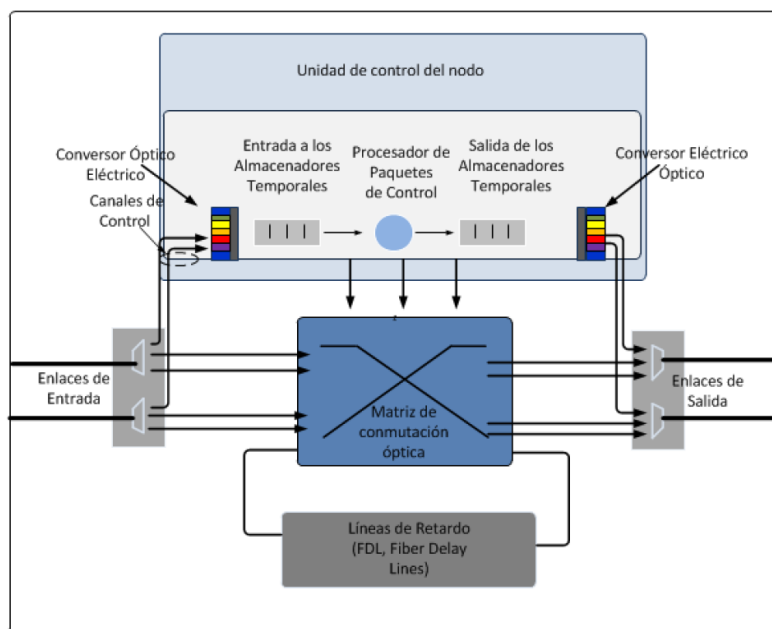


Figura 3.5 Arquitectura Nodo Central OBS. Tomada de [49] [11].



### 3.1.4 Protocolos de Reserva de Recursos

Como se mencionó en la sección 3.1.2.2, existen tres tipos de protocolos para la reserva de recursos en una red OBS, estos son: IBT (*In Band Terminator*), TAG (*Tell And Go*) y RFD (*Reserve a Fixed Duration*) [53].

En el protocolo IBT, cada ráfaga contiene una cabecera y un parámetro que indica su final, este protocolo deja que un nodo intermedio envíe el principio de una ráfaga sin que haya llegado el final de la anterior, disminuyendo de esa manera los retardos en la red [53] [57].

Por su parte, en el protocolo TAG basado en OBS, una fuente envía el BCP por el canal de control con el fin de reservar el ancho de banda a lo largo del camino y luego transmitir la ráfaga de datos. A diferencia de la conmutación óptica de circuitos (OCS), en la conmutación de ráfagas (OBS) se pueden enviar los datos por el canal de datos sin esperar recibir el reconocimiento (ACK) del paquete de control enviado. Después que los datos se envíen, otra señal de control se enviará para liberar el ancho de banda reservado anteriormente [37].

Finalmente, en RFD, a diferencia de los dos protocolos anteriores, solo ha sido estudiado para redes ópticas. Al igual que TAG, se envía el paquete de control (BCP) con el fin de reservar el ancho de banda requerido para la transmisión de la ráfaga, luego se envía la ráfaga de datos después de un tiempo de offset. La diferencia entre RFD y TAG, es que en RFD el ancho de banda se reserva durante un tiempo específico marcado por el paquete de control, ya que dentro del paquete de control está la longitud de la ráfaga [37].

En las redes OBS, los dos protocolos más atractivos para la señalización son: JIT (*Just In Time*) basado en TAG y JET (*Just Enough Time*) basado en RFD. En el protocolo JIT, un nodo OBS configura los conmutadores ópticos para la ráfaga; tan pronto como es recibido y procesado el paquete de control correspondiente, los recursos del nodo se ponen a disposición antes de la llegada de la ráfaga sin tener en cuenta tiempos de *offset*, lo que permite la simplicidad del sistema de señalización, pero también el uso ineficiente de la red. Mientras tanto, JET basado en RFD es el protocolo más utilizado en redes OBS, debido a que muestra una mejor utilización del ancho de banda al realizar la reserva de recursos únicamente desde la llegada de la ráfaga hasta que es conmutada y no desde la llegada del paquete de control al nodo. Este protocolo es el elegido para implementar en las redes OBS/WDM y OBS/FlexGrid, que son los temas de investigación de este trabajo de grado.

#### 3.1.4.1 Just in Time (JIT)

En este esquema, las peticiones de transmisión de una ráfaga se envían a un planificador central, el cual decide el instante en el que la ráfaga se transmitirá [58] [59]. La principal ventaja del algoritmo JIT radica en su simplicidad. Sin embargo, la utilización de recursos no es óptima ya los recursos son asignados, pero no son usados hasta que la ráfaga llega, lo que empeora el rendimiento global de la red [60].

En la Figura 3.6 se muestra el funcionamiento del protocolo JIT, en el cual primero se envía el paquete de control (BCP) solicitando reservar un canal para la transmisión de la ráfaga de datos; cuando el BCP llega al primer nodo intermedio, este es procesado y si



existe algún canal libre en ese momento, se inicia la reserva de los recursos, pero no los usa hasta que el BCP llegue al nodo destino y se haya establecido toda la ruta; de lo contrario, el mensaje de configuración que contiene el BCP es rechazado y la ráfaga se pierde [61].

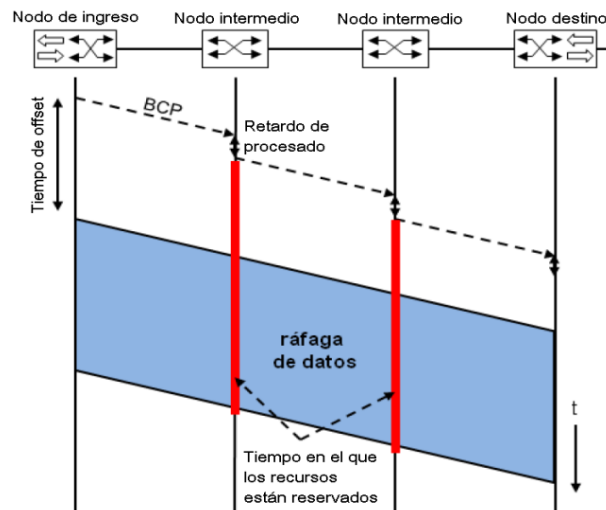


Figura 3.6 Funcionamiento del protocolo de señalización JIT. Adaptada de [60].

### 3.1.4.2 Just Enough Time (JET)

JET es el protocolo de reserva de mayor uso en la implementación de redes OBS. Está basado en TAG pero a diferencia de este se hace uso de un tiempo offset para separar el BCP del envío de la ráfaga. JET introduce el concepto de reservación atrasada (DR, *Delayed Reservation*), el cual permite la reserva de recursos en el instante que la ráfaga llegue al nodo central, no desperdiciando el tiempo de procesamiento del BCP [62], mejorando de esa manera la utilización de ancho de banda de la red [60]. Por lo anteriormente expuesto, en este trabajo de grado se implementa el algoritmo JET para la señalización en la red OBS.

En la Figura 3.7, se muestra el funcionamiento del protocolo JET con dos nodos intermedios y los nodos de frontera (ingreso y destino). Como se muestra, un nodo de ingreso tiene una ráfaga a ser transmitida, primero se envía un paquete de control (BCP) sobre un canal de señalización (que corresponde a un canal dedicado) hacia el nodo destino. El paquete de control es procesado en cada nodo siguiente con el objetivo de establecer un trayecto de datos completamente óptico para la ráfaga. Es decir, con base en la información que lleva el BCP, cada nodo selecciona un canal de datos adecuado sobre el enlace de salida, reservando el ancho de banda requerido sobre el mismo y configurando el conmutador óptico. Mientras tanto, la ráfaga espera en el nodo de ingreso en el dominio electrónico. Luego de un tiempo offset  $T$ , cuyo valor será determinado posteriormente, la ráfaga es enviada en una señal óptica sobre un canal de datos seleccionado [11].

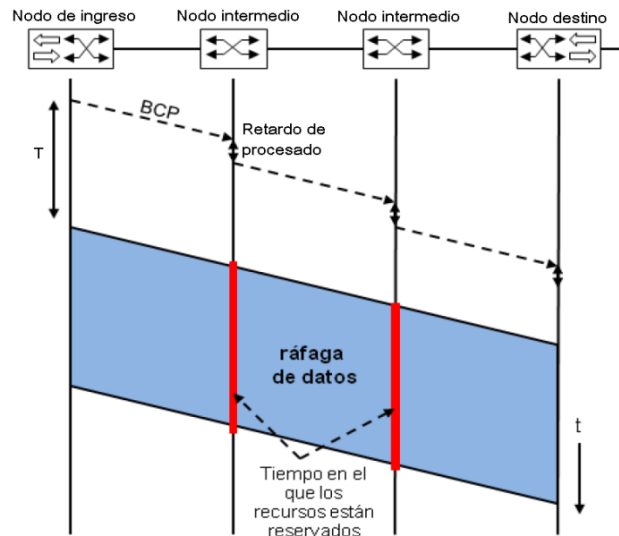


Figura 3.7 Funcionamiento del protocolo de señalización JET. Adaptada de [60].

### 3.1.5 Protocolos de Planificación

Cuando una ráfaga llega a un nodo se debe asignar un canal de datos y un intervalo de tiempo en el enlace de salida apropiado para que la ráfaga siga su camino hacia el destino. Al estudiar la planificación, se considera que los nodos OBS soportan conversión de canales, es decir que una ráfaga con un canal en interfaz de entrada, puede salir por un canal distinto en la interfaz de salida.

Existen diferentes algoritmos de planificación de ráfagas, que difieren principalmente en la manera de aprovechar las líneas de tiempo de los diferentes canales en las interfaces de salida. A continuación se describe la técnica de planificación más usada en OBS.

#### 3.1.5.1 Horizonte de planificación

Se define como el último instante de tiempo en el que un canal de datos está planificado para ser utilizado. El último canal disponible sin planificación (LAUC, *Latest Available Unscheduled Channel*) – Horizon, es un algoritmo de planificación simple, que contiene un registro del LAUC en cada canal de datos y selecciona como canal de salida aquel que tenga el horizonte de planificación más próximo al instante de llegada de la ráfaga, sin superarlo, consiguiendo menores pérdidas de datos [35] [60]. Por tales razones, Horizon es el algoritmo elegido para realizar el proceso de planificación de ráfagas en este trabajo de grado.

### 3.1.6 Selección de temporizador y umbral de longitud de ráfaga

Un problema en el ensamblaje de las ráfagas es escoger los valores apropiados de temporizador y de umbral de longitud de ráfaga para crear una ráfaga con el fin de minimizar probabilidad de pérdida de paquetes en una red OBS. La selección de tales valores es un tema en investigación. Si el umbral de longitud es demasiado corto, habrá un número elevado de ráfagas en la red, esto conlleva a un mayor número de contenciones, aunque la cantidad promedio de paquetes por contención, es menor. El elevado número de ráfagas también incrementará la presión sobre el plano de control

para procesar los paquetes de control de cada ráfaga de un modo rápido y eficiente. Además, si el tiempo de reconfiguración de conmutación no es despreciable, las ráfagas cortas conducen a una baja utilización de la red debido al elevado tiempo de conmutación de los encabezados para cada ráfaga conmutada. Por otra parte, si el umbral de la longitud de ráfaga es demasiado grande, habrá una reducción del número total de ráfagas dentro de la red, por lo tanto el número de contenciones reduce con relación a las ráfagas cortas, pero la cantidad promedio de paquetes perdidos por contención aumenta. Es por ello, que el rendimiento de una red OBS puede ser mejorado si los paquetes entrantes son ensamblados en una ráfaga de tamaño óptimo. El mismo argumento se cumple en los mecanismos de ensamblaje por temporizador [11]. En la Figura 3.8 se visualiza el esquema de ensamblaje de ráfaga basado en longitud de ráfaga umbral y temporizador, dependiendo de la carga de la red.

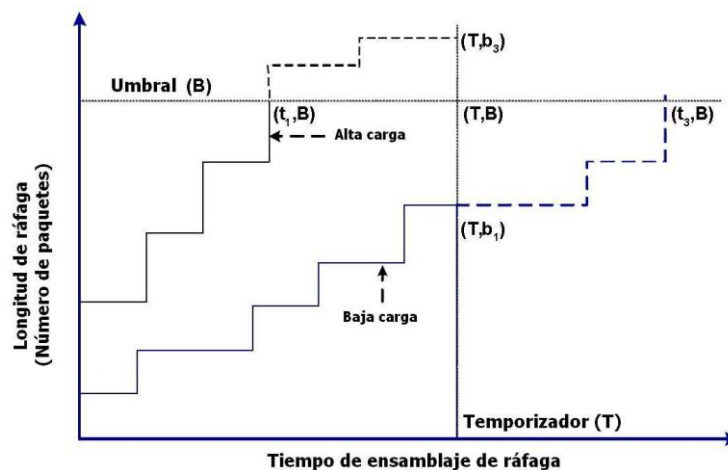


Figura 3.8 Efecto de la carga en los esquemas de ensamblaje por temporizador y umbral de longitud de ráfaga. [11]

### 3.2 RWA - ENRUTAMIENTO Y ASIGNACIÓN DE LONGITUD DE ONDA EN REDES OBS/WDM

En las redes de telecomunicaciones ópticas se presenta el problema de establecer las conexiones desde un nodo de origen hasta un nodo de destino siguiendo un camino óptico; este problema se conoce como enrutamiento (*routing*), que consiste en buscar un camino adecuado desde el nodo de origen hasta el nodo de destino, pasando por unos nodos intermedios, con el fin de encaminar la información. Además, en redes WDM se debe asignar una longitud de onda adecuada por la cual se va a transportar la información, proceso que se conoce como asignación de longitud de onda (*Wavelength Assignment*). Los problemas de enrutamiento y asignación de longitud de onda son comunes en el campo de las redes ópticas, la unión de los dos problemas se les conoce como RWA [16].

RWA busca elegir el camino más adecuado entre dos nodos de la red y asignar una longitud de onda para el transporte de la información. Algunos algoritmos realizan ambas operaciones de manera simultánea, sin embargo ello implica mayor complejidad computacional. De igual manera, es posible resolver los dos problemas de manera secuencial (R + WA), reduciendo complejidad computacional. Según lo anteriormente expuesto, en este trabajo de grado se implementa un algoritmo que afronta los problemas



de enrutamiento y asignación de longitud de onda de manera secuencial mediante técnicas heurísticas que se explicaran más adelante.

### 3.2.1 Algoritmos de Enrutamiento y Asignación de Longitud de Onda

El objetivo de un algoritmo RWA es alcanzar en lo posible, el mejor funcionamiento de la red teniendo en cuenta los límites de las condiciones físicas (número de fibras, capacidad de los enlaces, etc.). El problema RWA puede ser resuelto de numerosas formas, sin embargo, se pueden clasificar en estas dos versiones: RWA estático y RWA dinámico [63]. En RWA estático, los requerimientos de tráfico son conocidos de antemano, es decir, las demandas son del tipo “*Offline*”. Mientras tanto en RWA dinámico, las peticiones de conexión llegan de manera aleatoria, es decir, las demandas son del tipo “*online*”. El problema RWA estático surge en el diseño de la red y en la fase de planificación de la arquitectura de la red óptica, mientras que RWA dinámico se encuentra durante la fase de operación en tiempo real de la red [64].

#### 3.2.1.1 Algoritmos de Enrutamiento

En la literatura se encuentran tres estrategias heurísticas para dar solución al problema de enrutamiento en redes OBS, estas son: enrutamiento fijo, enrutamiento fijo alternado y enrutamiento adaptativo.

- **Enrutamiento fijo:** consiste en elegir la ruta más directa entre los nodos, esta conexión origen-destino siempre es la misma (ruta fija), si dicha ruta llegase a fallar o no es posible establecer el camino óptico se rechaza la petición. Esta técnica busca disminuir el tiempo de establecimiento de conexión, pero es propensa a tener alta probabilidad de bloqueo. Dentro de las técnicas de enrutamiento fijo se destacan: algoritmos de camino más corto (SP, *Shortest Path*), el cual busca el mínimo consumo de recursos; algoritmo peso por salto (HW, *Hop Weight*), su objetivo es minimizar la probabilidad de bloqueo, eligiendo el camino con el menor número de saltos; algoritmo de la menor distancia (DW, *Distance Weight*), con esta técnica se obtiene una reducción en los retardos ya que se selecciona el camino de menor distancia.
- **Enrutamiento fijo alternado:** establece un determinado número de caminos ópticos calculados a través de una función de costo fija, si el primer camino no se logra establecer se verifica con los otros caminos, si no se logra establecer la ruta, la solicitud de conexión es rechazada. Con esta técnica se obtiene una mejora en la capacidad de la red y en la probabilidad de bloqueo, aunque con un tiempo de conexión más largo debido al número de rutas que se calcula, un ejemplo de esta estrategia es el algoritmo Mínimo Número de Saltos (MNH, *Minimum Number of Hops*), el cual permite disminuir la probabilidad de bloqueo asignando inicialmente la longitud de onda a las rutas más cortas.
- **Enrutamiento adaptativo:** el establecimiento de las rutas se lleva a cabo en tiempo real, es decir, las conexiones se actualizan al establecerse o terminar una conexión. Esta técnica trabaja creando enlaces dinámicamente, debido a esto se requiere un tiempo mayor para generar el camino óptico, pero permite disminuir la probabilidad de bloqueo de la red. Algunos algoritmos representativos de este tipo de técnica son: longitudes de onda disponibles (AW, *Available Wavelengths*), saltos y longitudes de onda disponibles (HAW, *Hop and Available Wavelengths*), longitudes de onda totales y



disponibles (TAW, *Total and Available Wavelengths*), número de saltos, longitudes de onda totales y disponibles (HTAW, *Hop count and Total and Available Wavelengths*), costo futuro modificado (MFC, *Modified Future Cost*), enrutamiento de menor congestión (LCPR, *Least Congested Path Routing*), balance de carga de enrutamiento y asignaciones de longitud de onda (LBRWA, *Load Balance RWA*), desviación de carga de la peor ruta (HPLD, *Heaviest Path Load Deviation*). En la Tabla 3.1, se hace un resumen sobre los diferentes tipos de algoritmos de enrutamiento.

Tabla 3.1 Algoritmos de enrutamiento [16].

Algoritmo	Estrategia	Objetivo	Clasificación
“Shortest Path”, SP [11].	Minimiza el peso total del camino.	Minimizar el consumo de recursos.	Fijo o fijo alternado.
“Hop Weight”, HW [65].	Selecciona el camino de mínimo número de saltos.	Minimizar la probabilidad de bloqueo.	Fijo o fijo alternado.
“Distance Weight”, DW [65].	Selecciona el camino de mínima distancia en microsegundos.	Minimizar el retardo.	Fijo o fijo alternado
“Minimum Number of Hops”, MNH [66].	Disminuye el enlace más cargado y asigna en primer lugar la longitud de onda (“ $\lambda$ ”) a las rutas más largas.	Minimizar la probabilidad de bloqueo.	Fijo alternado
“Available Wavelengths”, AW [65].	Selecciona el camino con mayor número de longitudes de onda disponibles.	Minimizar la probabilidad de bloqueo.	Adaptativo
“Hop and Available Wavelengths”, HAW [65].	Selecciona el camino considerando el número de saltos y las longitudes de onda disponibles.	Minimizar la probabilidad de bloqueo.	Adaptativo
“Total and Available Wavelengths”, TAW [65].	Considera el estado de la red, longitudes de onda disponibles y totales.	Minimizar la probabilidad de bloqueo.	Adaptativo
“Hop Count and Total Wavelengths and Available Wavelengths”, HTAW [65].	Considera el número de saltos, el estado de la red, y las longitudes de onda disponibles y totales.	Minimizar la probabilidad de bloqueo.	Adaptativo
“Modified Future Cost”, MFC [67].	Emplea una función de peso combinado de distancia y carga de enlace.	Mejorar la probabilidad de bloqueo.	Adaptativo
“Least Congested Path Routing”, LCPR [14] y [68].	Selecciona el camino de mínima congestión.	Equilibrado de carga.	Adaptativo
“Weight Least Congested Path	Selecciona el camino	Equilibrado de carga.	Adaptativo



Routing”, WLCPR [15] y [69].	de mínima congestión con pesos.	Admite la consideración de otros criterios.	
“Load Balance RWA”, LBRWA [70].	Equilibra la carga de los enlaces.	Equilibrado de carga.	Adaptativo

### 3.2.1.2 Algoritmos de Asignación de Longitud de Onda

La asignación de longitud de onda busca asociar un camino óptico a un enlace, eligiendo la longitud de onda que se encuentre disponible en ese momento, teniendo en cuenta la restricción de continuidad, es decir que la misma longitud de onda debe ser usada en todos los enlaces de la ruta.

El proceso de asignación de longitud de onda puede realizarse de manera paralela al enrutamiento; las técnicas para la asignación de longitud de onda se efectúan de tres maneras: organizando las longitudes de onda de acuerdo al orden en el que fueron usadas en la última ocasión, realizando una elección aleatoria, o haciendo uso de expansión o contracción del espectro de las longitudes de onda que han sido usadas en los enlaces. Algunos algoritmos encontrados en la literatura para la asignación de la longitud de onda son: la Técnica Aleatoria (R, *Random*), Algoritmo de Primer Ajuste (FF, *First Fit*), Último Canal Libre Disponible (LAUC, *Latest Available Unused Channel*), Menos usado (LU, *Least Used*), Más usado (MU, *Most Used*), Producto mínimo (MP, *Min Product*), Menor carga (LL, *Least Loaded*), Mínima suma (MS, *Min Sum*), Máxima suma (M $\Sigma$ , *Max Sum*), Reserva de Longitudes de Onda (WR, *Wavelength Reservation*), Protección umbral (TP, *Threshold Protection*), entre otros [56] [71]. A continuación se describirán algunos de los algoritmos de asignación de longitud de onda más utilizados en redes OBS/WDM:

- **Método aleatorio (*Random*)**

Luego de haber establecido una ruta, el algoritmo heurístico aleatorio hace una búsqueda entre las longitudes de onda disponibles en la ruta y selecciona una de ellas aleatoriamente [14].

- **Método de primer ajuste (FF)**

Se realiza una numeración a las longitudes de onda existentes; cuando se desea realizar una conexión se elige entre dichas longitudes la primera que se encuentre disponible empezando desde la de menor numeración hasta la de mayor numeración.

- **Método del menos usado (LU)**

Selecciona la longitud de onda que se esté usando menos en la red, con el objetivo de hacer un balance de cargas en todas las longitudes de onda [15].



- **Método del más usado (MU)**

Es un método heurístico, el cual selecciona la longitud de onda que más se esté usando en la red, ofrece un mejor desempeño que los métodos “menos usado” y “primer ajuste” [15].

- **Método del Último canal libre disponible (LAUC)**

Está basado en el algoritmo de planificación Horizon (Ver sección 3.1.5.1). En este método, el planificador guarda la información del horizonte<sup>10</sup> de cada longitud de onda para disminuir al máximo las brechas de ancho de banda generadas por los tiempos de reserva. Este es el algoritmo implementado en este trabajo de grado para la asignación de longitud de onda.

### 3.3 RSA - ENRUTAMIENTO Y ASIGNACIÓN DE ESPECTRO EN REDES OBS/FLEXGRID

Como se ha definido en anteriores secciones, una red óptica está constituida por una topología física, de la cual se pueden obtener o instanciar diferentes topologías lógicas, junto con una serie de equipos y dispositivos ópticos que la caracterizan. Igualmente, un enlace corresponde a una fibra óptica; y un nodo representa todo el equipamiento necesario para poder establecer, encaminar, y terminar conexiones ópticas a través de las fibras de la red. Las conexiones ópticas son caminos que se establecen con el fin de atender las peticiones de conexión del cliente que llegan a la red. Una petición de conexión consta principalmente de la siguiente información: los nodos origen y destino para realizar la conexión, y la cantidad de ancho de banda a transportar (expresado en Mbps o Gbps). En una red óptica elástica (FlexGrid), el proceso de establecimiento de estas conexiones ópticas se obtiene al resolver el problema denominado enrutamiento y asignación de espectro (RSA, *Routing and Spectrum Assignment*), el cual tiene como objetivo encontrar una ruta que contenga espectro suficiente para albergar el ancho de banda demandado por el cliente, estableciendo la conexión si esa capacidad existe y se encuentra libre o rechazándola en caso contrario [72]. A diferencia de WDM donde se aplica el concepto de RWA, utilizando longitudes de onda continuas para asignar los recursos, en RSA se asignan un número continuo de slots (intervalo continuo de frecuencia) a cada conexión óptica; el número de slots de frecuencia requeridos depende de las necesidades o requerimientos de capacidad del cliente.

Para establecer una conexión óptica elástica (EOP, *Elastic Optical Path*), el problema se divide en dos partes; por un lado la operación de enrutamiento (R), que consiste en el cálculo de la ruta entre el nodo origen y el destino a través de la topología de la red; y por otra, la selección de los recursos espectrales que se asignarán a la petición (SA, *Spectrum Assignment*) [3]. Para dar solución a este problema, la literatura propone diversos algoritmos para ejecutar ambas operaciones simultáneamente (Joint RSA) o de manera independiente (R+SA), los cuales se verán con mayor detalle en las siguientes secciones.

---

<sup>10</sup> Tiempo futuro en el cual una longitud de onda estará libre para ser asignada a una nueva conexión óptica

### 3.3.1 Funcionamiento RSA

En una red óptica elástica (FlexGrid), el espectro óptico disponible se divide en *slices* (ranuras), que son porciones de espectro con una anchura fija que generalmente es de 6.25 GHz; dos *slices* consecutivos conforman un slot, que está definido por su frecuencia central (CF) y el ancho de slot. La frecuencia central (CF) define el lugar donde se centra el espectro asignado y por lo tanto permite el posicionamiento de cada slot en el espectro óptico. Por otra parte, la porción de espectro óptico asignado a una conexión óptica, caracterizado por su frecuencia central y el número de slots se llama canal [2]. Con el fin de ilustrar los conceptos de conexión óptica, espectro óptico, frecuencia central, canal, slot, y slice, la Figura 3.9 representa un enlace de fibra óptica en el que se establece una conexión utilizando un canal de 3 slots de frecuencia, para una red óptica elástica utilizando la tecnología Flexgrid.

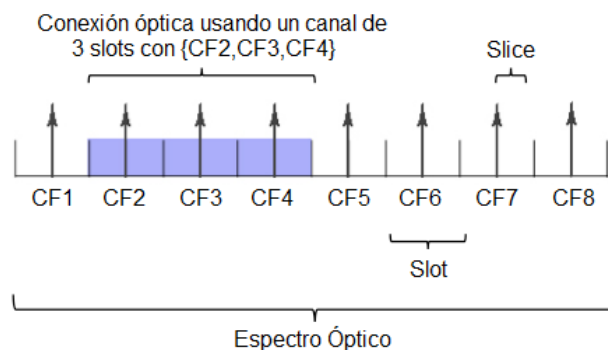


Figura 3.9 Representación lógica de un enlace de fibra óptica en FlexGrid. Adaptada de [2].

De manera similar al problema de enrutamiento y asignación de longitud de onda (RWA) en las redes ópticas WDM, el problema de enrutamiento y asignación de espectro (RSA) se resuelve para establecer las conexiones ópticas en una red óptica elástica o FlexGrid [2] [73]. El objetivo de RSA, es encontrar una ruta con suficiente espectro libre para albergar el ancho de banda requerido por las demandas de tráfico [2]; es decir que este problema se debe afrontar en dos partes, por un lado la operación de enrutamiento, y por otro, la asignación de los recursos espectrales a la conexión óptica [3].

En la operación de enrutamiento, las posibles rutas pueden ser ordenadas por distancia, número de nodos a lo largo de la ruta y otros parámetros que se consideren convenientes. Por ejemplo, para determinar el camino más corto entre los nodos origen y destino (menor número de saltos), se puede adoptar el algoritmo de Dijkstra, también llamado algoritmo de caminos mínimos, el cual es un algoritmo para la determinación del camino más corto en una red [74].

Con el fin de ejemplificar el proceso de enrutamiento, la Figura 3.10 presenta una topología de red simple con 6 nodos y 8 enlaces, la cual muestra tres posibles caminos para establecer una conexión óptica entre el nodo origen A y el destino F; el primer camino óptico posible sigue la ruta que conecta los nodos A, B, D y F; el segundo, los nodos A, B, C, E, F; y el tercero, los nodos A, C, E, y F.



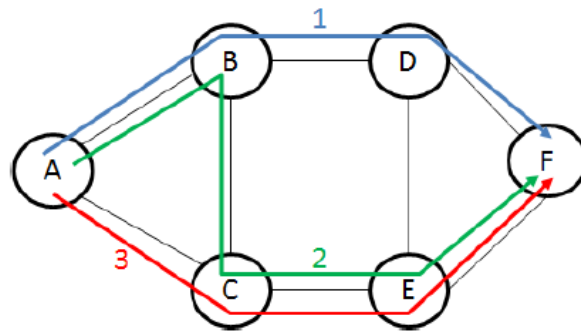


Figura 3.10 Topología de red con 6 nodos y 8 enlaces. Tomada de [74].

La selección de la ruta depende de la estrategia utilizada en la asignación de espectro, la cual, para el caso de las redes ópticas elásticas está sujeta a las siguientes condiciones [75]:

**Contigüidad del espectro:** todos los slots de frecuencia que conforman el canal en una conexión óptica, deben ser adyacentes en el espectro.

**Continuidad del espectro:** el canal asignado a una conexión óptica, debe ser el mismo en todos los enlaces de la ruta (es decir, utilizando la misma frecuencia central), para que de esta manera, no sea necesaria la conversión electro-óptica (E/O/E) de la señal en ningún salto de la ruta.

**No superposición del Espectro:** un slot de frecuencia en un enlace sólo se puede utilizar para una conexión a la vez.

**Espectro limitado:** hay un número finito de slots en cada enlace.

**Bandas de guarda:** como en todos los filtros pasa-banda reales, las funciones de transferencia no son perfectamente rectangulares. Esto hace que sea necesario separar las conexiones espectralmente adyacentes en cada fibra, por al menos un slot no asignado para evitar interferencias.

Con el fin de ilustrar las restricciones de continuidad y contigüidad, la Figura 3.11 muestra un ejemplo de cómo se establecería una petición de conexión entrante en el nodo B con destino al nodo D, demandando una cantidad de ancho de banda que debe ser suministrada por 2 slots de frecuencia. En la fase de búsqueda de la ruta, se debe encontrar una que tenga suficiente capacidad utilizable, generalmente la más corta posible (porque es la que utiliza menos recursos). Sin embargo, una condición que tienen que cumplir las conexiones ópticas es que la porción de espectro usada en cada enlace de la ruta (denominado canal) sea la misma (es lo que se denomina continuidad de espectro). Como se observa en la Figura 3.11, aunque la ruta formada por los enlaces B-A y A-D es la más corta en número de saltos y tiene capacidad libre disponible, no se puede cumplir la condición de continuidad. Es por eso que la ruta finalmente establecida es la que sigue los enlaces B-A, A-C, y C-D, que sí tiene suficientes slots continuos en todos los enlaces para establecer la conexión.

En la literatura es posible encontrar un gran número de trabajos de investigación acerca de soluciones al problema RSA. En la sección 3.2.1.1 se hizo un estudio acerca de las diversas técnicas heurísticas utilizadas para dar solución al problema de enrutamiento. En

la siguiente sección (3.3.2) se presenta un estudio sobre las diferentes técnicas y esquemas de asignación de espectro, aplicadas a redes FlexGrid.

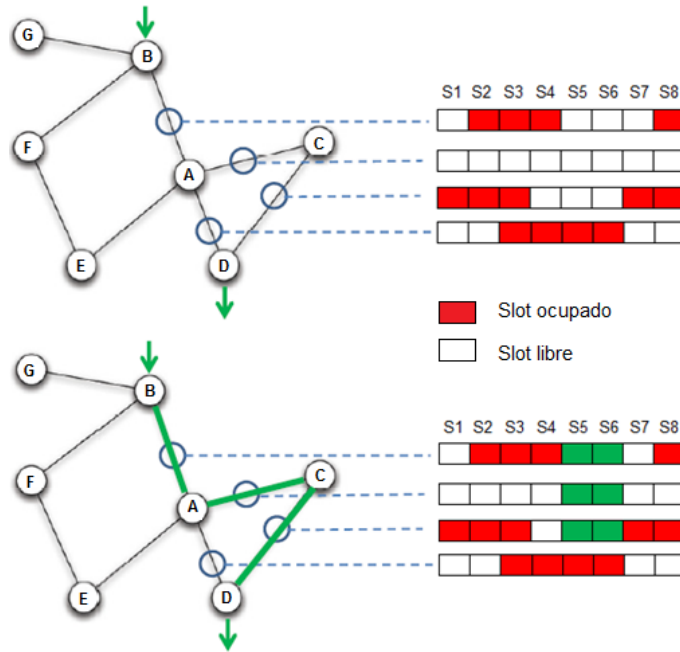


Figura 3.11 Establecimiento de una conexión óptica elástica. Adaptada de [72].

### 3.3.2 Esquemas de Asignación de Espectro

Un aspecto importante de las redes ópticas basadas en FlexGrid, es su inherente flexibilidad en cuanto al ancho de banda que se asigna a cada canal óptico, lo cual permite que el ancho de banda del canal se pueda ajustar dinámicamente en función de la demanda que se recibe, y de esa manera los recursos espectrales pueden ser mejor aprovechados mediante una asignación del espectro más acorde a las necesidades reales de la red [3].

En este sentido, la asignación del espectro es normalmente fija durante todo el tiempo que el canal este asignado, pero puede ir variando en cada periodo de tiempo en función de la demanda que se tenga en cada momento [3]. En esta sección, se presentan tres esquemas diferentes para la asignación de espectro, las cuales se presentan a continuación:

#### 3.3.2.1 Asignación de Espectro Fijo en el tiempo

El esquema de Asignación de Espectro Fijo (FSA, *Fixed Spectrum Assignment*), descrito en la Figura 3.12, representa el caso en el cual no se permite el concepto de elasticidad en el tiempo [2]. Por lo tanto, bajo este esquema tanto la frecuencia central (CF) y el ancho de espectro (SW) asignados a una conexión óptica, permanecen fijos para cada canal a lo largo del tiempo [3] [2]. Las demandas podrán usar parte o todo el espectro asignado en cada periodo de tiempo pero nunca compartirán espectro con otros canales u otras demandas [3].

Además, se debe tener en cuenta que al comparar los requerimientos de ancho de banda de cierta demanda con la capacidad del canal asignado, se tienen dos casos de estudio:

- Cuando el requerimiento de ancho de banda de una conexión es más bajo que la capacidad del canal, la cantidad de espectro utilizado para transportar ese tráfico es menor que el asignado y por tanto se está desaprovechando parte del espectro que podría ser requerido por otro canal u otra demanda en algún instante de tiempo posterior [2]. La Figura 3.12 (a) muestra como el ancho de banda requerido en el tiempo  $t$  es igual a la capacidad del canal asignado, pero el ancho de banda es menor que la capacidad asignada en un tiempo posterior  $t'$ .
- Cuando el ancho de banda requerido por una demanda es mayor que la capacidad del canal asignado, no es posible atender la demanda [2]. La Figura 3.12 (b) muestra que en un tiempo  $t$  la demanda puede ser atendida, pero en el tiempo  $t'$  no es posible ya que la cantidad de espectro es insuficiente.

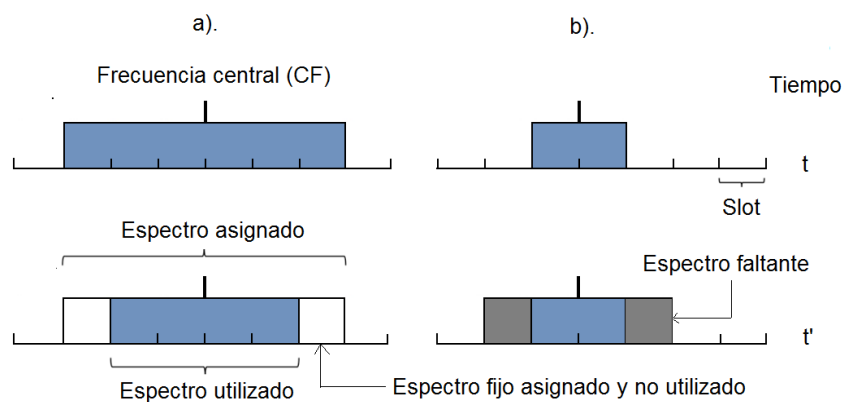


Figura 3.12 Esquema de asignación de espectro fijo.

### 3.3.2.2 Asignación de Espectro Semi-Elástico en el tiempo

A diferencia del esquema fijo (FSA), en el esquema de Asignación de Espectro Semi-Elástico (SSA, *Semi-Elastic Spectrum Assignment*) la frecuencia central (CF) permanece fija, pero el ancho de espectro asignado puede variar en cada periodo de tiempo [3] [2]. En este caso, los slots borde de los canales son compartidos entre los dos canales adyacentes, y se le asigna a uno o a otro en función de la demanda como se observa en la Figura 3.13. En este esquema puede tener dos variantes:

- Si el ancho de banda requerido aumenta, nuevos slots contiguos pueden ser asignados en el extremo de ambos lados de la CF siempre y cuando estos slots cumplan con las condiciones de continuidad y contigüidad del espectro (Ver sección 3.3.1) [2]. La Figura 3.13 representa este caso para una conexión óptica que incrementa el ancho de banda requerido de 4 a 8 slots de frecuencia.
- Si el ancho de banda requerido se reduce, la capacidad del espectro asignado se reducirá y los slots no necesarios en cada extremo del espectro asignado serán liberados y estarán disponible para otras conexiones si es necesario [2]. La Figura 3.13 representa este caso para una conexión óptica que reduce el ancho de banda requerido de 6 a 2 slots de frecuencia.

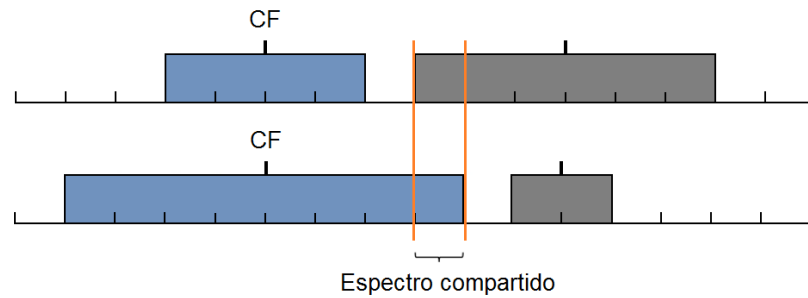


Figura 3.13 Esquema de Asignación de Espectro Semi-Elástico.

### 3.3.2.3 Asignación de Espectro Elástico en el tiempo

En el esquema de Asignación de Espectro Elástico (ESA, *Elastic Spectrum Assignment*), tanto la frecuencia central (CF) y el ancho espectral (SW) pueden variar en cada periodo de tiempo [3], como se observa en la Figura 3.14. De esta manera, los canales compartirán espectro pero no se asignará el mismo slot a dos canales distintos en el mismo periodo de tiempo. Puede haber dos variantes de este esquema: ESA con Expansión/Contracción de espectro y ESA con reasignación de espectro.

- Expansión/Contracción de espectro: en este caso, el espectro compartido entre dos peticiones será como máximo, la anchura de espectro asignado al más pequeño de los dos canales. El movimiento de la CF está limitado al rango de frecuencias de la petición más ancha. Ver Figura 3.14.
- Reasignación de espectro: en este caso, cualquier parte del espectro puede ser recolocado en otro espacio. Los movimientos de la CF no están limitados. Ver Figura 3.15.

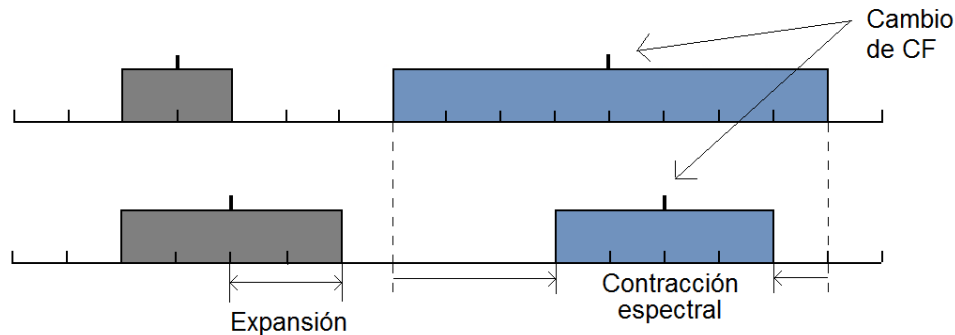


Figura 3.14 Esquema de Asignación de Espectro Elástico con Expansión/Contracción.

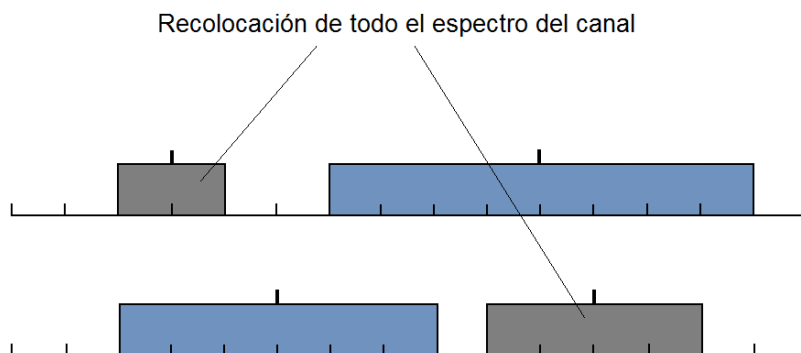


Figura 3.15 Esquema de Asignación de Espectro Elástico con Reasignación.

En esta sección se han presentado los distintos esquemas de asignación del espectro, cada esquema presentado tiene un mayor grado de flexibilidad que el anterior (siendo el de asignación fija el menos flexible y por lo tanto el menos complejo), lo que aumenta la ganancia en ahorro de espectro pero también aumenta la complejidad de los algoritmos encargados de ejecutar estas técnicas. En este trabajo de grado se implementa un algoritmo con la técnica de asignación de espectro fijo en el tiempo, ya que es el menos complejo pero permite analizar el comportamiento de la red con esta nueva tecnología (FlexGrid) respecto a WDM.

### 3.3.3 Algoritmos de Enrutamiento y Asignación de Espectro

Los algoritmos de Enrutamiento y Asignación de Longitud de Onda (RWA) en las redes WDM no pueden ser directamente aplicados en las redes ópticas FlexGrid [76]; en su lugar, se debe implementar algoritmos de Enrutamiento y Asignación de Espectro (RSA), los cuales se pueden clasificar de la misma manera que los RWA de la siguiente manera: algoritmos RSA estáticos (*offline*) y algoritmos RSA dinámicos (*online*) [3].

#### 3.3.3.1 Algoritmos RSA Estáticos

En los algoritmos RSA estáticos (*offline*), la topología de la red y las demandas de tráfico son conocidos de antemano [77]. En este caso, el problema RSA se puede abordar como la resolución del enrutamiento y asignación de espectro de manera conjunta (Joint RSA). Con este planteamiento del problema RSA, la mayor dificultad que se presenta es el gran número de condiciones que plantea el problema, lo que introduce una mayor complejidad de cómputo a la hora de calcular el camino óptimo para cada petición, optimizando a su vez la asignación de espectro [3]. Para reducir la complejidad, es posible descomponer el problema RSA en dos sub-problemas: enrutamiento y asignación de espectro (R+SA), abordados por separado y de forma secuencial; sin embargo, abordar los dos sub-problemas de forma secuencial no garantiza una solución óptima.

El cálculo de la solución óptima a este problema (RSA) se computa mediante un ILP (*Integer Linear Programming*). El ILP es un método de programación matemático para la resolución de problemas complejos y la obtención de soluciones enteras óptimas, el cual se describe como un conjunto de variables, una o varias funciones objetivo, que suelen ser la maximización o minimización de alguna variable; en el caso de las redes ópticas elásticas (FlexGrid), estas funciones pueden ser: maximizar el número de slots de



frecuencia consecutivos dejados libres luego de una petición, minimizar el número de saltos de una ruta, o minimizar la posición en el espectro del último slot de frecuencia asignado a una petición [3].

En general, diferentes estudios en la literatura sugieren implementar algoritmos heurísticos con el fin de dar solución a los problemas RSA, abordando las dos operaciones de manera simultánea o secuencial, ya que estos algoritmos son menos complejos computacionalmente que los presentados en esta sección.

### 3.3.3.2 Algoritmos RSA Dinámicos

En los algoritmos RSA dinámicos (*online*), la topología de la red es conocida de antemano, pero a diferencia de los RSA estáticos, las demandas de tráfico llegan en un orden aleatorio [77].

El caso dinámico (*online*), consiste en atender las peticiones dinámicamente según van llegando; las peticiones de demanda se van ejecutando según llegan, es decir, la red se va ocupando conforme las peticiones se van atendiendo, por lo que no se obtendrá una solución óptima en este caso. La solución dinámica del problema RSA se plantea sobre todo para casos de restauración de una conexión óptica, proceso que debe realizarse mientras el servicio se mantiene activo y en el menor tiempo posible. Otro posible caso de uso es la reasignación de recursos de un canal debido a algún cambio significativo en la red (la saturación de los recursos de determinados enlaces, la liberación de canales dando lugar a nuevas posibilidades de conexión) o la introducción de una nueva petición de conexión cuando la red ya está en funcionamiento y el resto de las demandas atendidas [3].

Además, el caso dinámico es aún más difícil que el estático debido al tráfico aleatorio de entrada/salida en cada nodo y la variación de la demanda de tráfico en el tiempo [77], por lo que la mayoría de los estudios proponen algoritmos heurísticos para resolver el problema RSA dinámico. Por tanto, en esta segunda familia de algoritmos solo se tendrá en cuenta aquellos denominados heurísticos debido a su menor tiempo de computación [3]. De acuerdo a la forma en la cual el algoritmo da solución al problema RSA, estos pueden clasificados en dos grupos: algoritmos de una sola etapa (*One-Step*) y en dos etapas (*Two-Step*) [77].

- **Algoritmos de una etapa (*One-Step*):** estos algoritmos resuelven las operaciones de enrutamiento y asignación de espectro de manera simultánea [3]. Algunos ejemplos de estos tipos de algoritmos son:
  - *Modified Dijkstra's Shortest Path* (MSP)
  - *Spectrum-Constraint Path Vector Searching* (SCPVS)
- **Algoritmos de dos etapas (*Two-Step*):** Estos algoritmos descomponen el problema RSA en dos sub-problemas, por un lado la operación de enrutamiento, y por otro la asignación del espectro, ambas operaciones las resuelve de manera secuencial [3] [8]. En la sección 3.3.3.3 se verán con mayor detalle.



### 3.3.3.3 Algoritmos Heurísticos para RSA Estáticos y Dinámicos

En la literatura se han propuesto algunos algoritmos heurísticos con el fin de dar solución al problema RSA de manera secuencial (en dos etapas), tanto para el escenario estático como dinámico, temas expuestos en anteriores secciones.

En el caso de los algoritmos RSA de dos etapas (*Two-Step*), primero se resuelve el problema de enrutamiento (cálculo de la ruta); el cual puede ser estático, donde las trayectorias se calculan y se fijan, o adaptativo, donde las trayectorias calculadas y su orden puede variar dependiendo del estado de la red [77]. Para este trabajo de grado se utilizará el algoritmo de enrutamiento de caminos más cortos (algoritmo de Dijkstra) tanto para abordar el problema RWA y RSA. Una vez calculadas las posibles rutas y ordenadas de la más corta a la más larga (respecto a número de saltos), se utilizará uno de los siguientes algoritmos para la asignación de espectro:

- **First Fit (FF):** en este esquema, todos los slots de frecuencia están numerados (índice de slot). Una vez calculadas las posibles rutas, este algoritmo busca los slots consecutivos necesarios para establecer la conexión en orden ascendente del índice de slot, y selecciona la primera ruta encontrada y los slots que cumplan con los requisitos de la solicitud de conexión. Este algoritmo es la versión modificada del algoritmo heurístico *First Fit* para redes WDM [8].
- **Random Fit (RF):** además del algoritmo FF mencionado, hay muchos otros algoritmos de asignación del espectro que usan los principios de algoritmos heurísticos RWA. Uno de ellos es el algoritmo de RF, el cual realiza una búsqueda de slots consecutivos que cumplan con los requerimientos de solicitud de conexión y los asigna de manera aleatoria (generalmente con una distribución de probabilidad uniforme) [73] [8].
- **Smallest Fit (SF):** la única diferencia entre SF y dos otros algoritmos mencionados es que la solicitud de conexión se coloca en la banda espectral más pequeña disponible a lo largo de la primera ruta encontrada [8].
- **Lowest Starting Slot (LSS):** en este esquema, para cada posible ruta calculada de antemano, este algoritmo busca los primeros slots consecutivos factibles para la nueva solicitud en orden ascendente del índice de slot y selecciona la ruta con el slot inicial más bajo [8].
- **Void Filling (VF):** selecciona la ruta con el menor número de huecos consecutivos posibles. Esto sirve para que la fragmentación en el espectro sea la menor posible [3].

En la Tabla 3.2, se presentan una lista de los algoritmos RSA más comunes encontrados en la literatura.



Tabla 3.2 Algoritmos RSA encontrados en la literatura. Adaptada de [3].

ALGORITMO	ILP	HEURÍSTICA	
RSA	ANT colony– Based RSA	RSA	Modified Dijkstra Shortest Path (MSP)
			Spectrum-Constraint Path Vector Searching (SCPVS)
	Maximize Common Large Segment (MCLS)	R + SA	KSP + Void Filling
			KSP + Lowest Starting Slot (LSP)
			KSP + Most Subcarriers First (MSF)
			KSP + First Fit (FF)

De acuerdo a lo expuesto en este capítulo, para este trabajo de grado se implementa el algoritmo de Dijkstra para afrontar el problema de enrutamiento tanto en las redes OBS/WDM como en OBS/FlexGrid. De igual manera, se implementa el algoritmo LAUC (Último Canal Libre Disponible) para dar solución al problema de asignación de longitud de onda en la red OBS/WDM, mientras que en la red OBS/FlexGrid se implementa un algoritmo heurístico basado en el LAUC de WDM (LAUC adaptado o modificado) para la asignación de espectro. Estos algoritmos se verán con mayor detalle en el Capítulo 4.





## CAPÍTULO 4: IMPLEMENTACIÓN

### 4.1 METODOLOGÍA

Este capítulo contiene la descripción y caracterización del modelo de simulación de la red NSFNET OBS, abordando los problemas RWA (WDM) y RSA (FlexGrid), para lo cual se describe la metodología empleada en el desarrollo de este trabajo de grado. Esta metodología debe cumplir con las etapas de planificación, diseño y simulación del sistema, por lo que se propone la mostrada en la Figura 4.1.

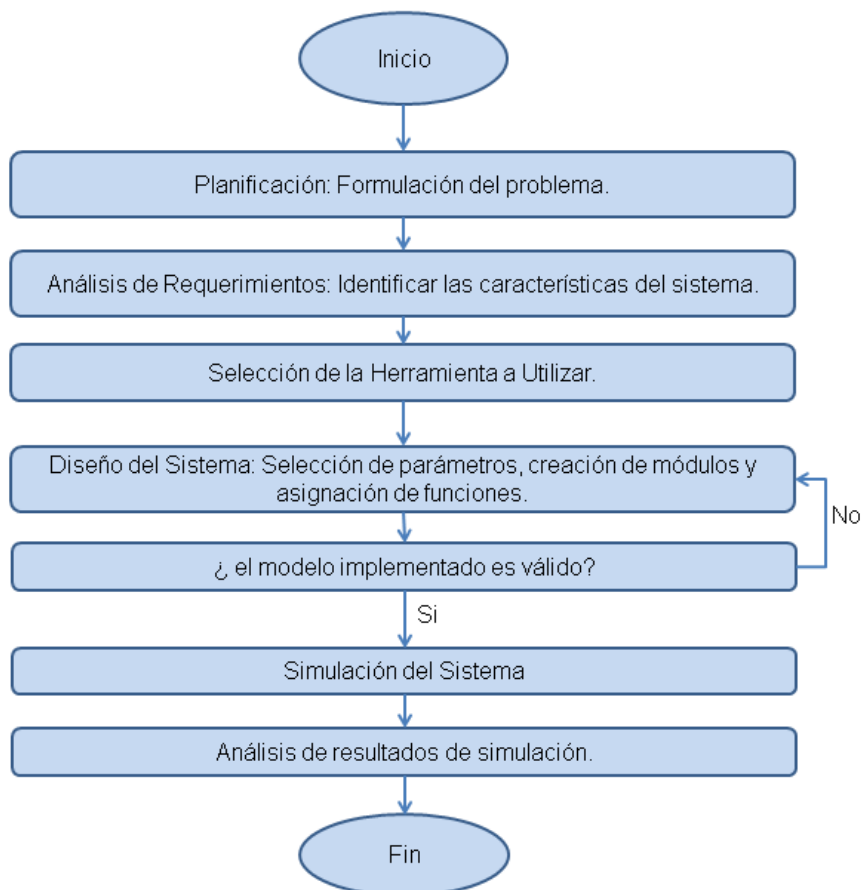


Figura 4.1 Metodología propuesta para el desarrollo y simulación del sistema. Adaptada de [78]

La etapa de prueba o simulación de cada uno de los algoritmos desarrollados (RSA y RWA), comienza con la etapa de planificación, en la cual se formula el problema; al mismo tiempo se debe hacer un análisis de requerimientos, en la cual se identifica las características del sistema. Una vez se cumplen estas etapas, se debe identificar las posibles herramientas a utilizar para la implementación de los módulos de la red. Posteriormente, se debe diseñar el modelo, implementarlo y verificar su correcto funcionamiento. Finalmente, se define los casos de estudio con el fin de ejecutar la simulación y analizar sus resultados.



## 4.2 SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

Para el desarrollo de este trabajo de grado, es necesario utilizar una herramienta software que permita simular el comportamiento de una red OBS, al implementar algoritmos RWA y RSA sobre una misma topología de red (NSFNET), y de esa manera analizar el desempeño de la red en términos de la probabilidad de bloqueo y el retardo extremo a extremo<sup>11</sup>.

En esta sección se analizan las herramientas más reconocidas en el área de redes de telecomunicaciones que ofrecen el soporte y la precisión en cuanto a rendimiento y escalabilidad necesarias para el desarrollo de este trabajo de grado. A continuación se presentan algunas de las herramientas que según la literatura han sido usadas para simular este tipo de redes:

### 4.2.1 NS-2 (*Network simulator 2*)

Es una de las herramientas de código abierto más confiable y de mayor uso para la implementación de proyectos en simulación. NS-2 se encuentra basado en eventos discretos, cuyas simulaciones están compuestas por código C++, usando lenguaje de comandos orientado a objetos para la definición de escenarios de simulación. Este simulador permite la configuración de gran cantidad de parámetros tales como la topología de la red, la pila de protocolos y parámetros específicos de cada protocolo, para evaluar el impacto de diferentes tipos de tráfico de red. Las principales desventajas de NS-2 radican en que esta herramienta no posee interfaz gráfica, lo que ocasiona que el modelado sea una tarea complicada, además, el uso de scripts en la programación implica un aprendizaje previo por parte del usuario, lo que se traduce en mayor consumo de tiempo [79] [80].

### 4.2.2 NS-3 (*Network simulation 3*)

Esta herramienta es un simulador de eventos discretos de red de código abierto, que tiene como principales objetivos lograr un mayor énfasis en los niveles 2 y 4 del OSI y que su uso sea principalmente educativo; a diferencia de NS-2, NS-3 está escrito solo en C++ lo que lo hace más fácil de depurar, además, esta herramienta ya posee una interfaz gráfica, la cual soporta algunas formas de animación visual para todo o parte de la simulación. Respecto a las tecnologías, NS-3 permite simulaciones sobre IPv4 e IPv6, Wireless (e.g., WiFi, Wimax) y algoritmos de enrutamiento (e.g., OLSR y AODV) [80].

### 4.2.3 NCTUNS (*National Chiao Tung University Network Simulator*)

Es una herramienta de código abierto y se considera como uno de los mejores simuladores en las comunidades networking debido a su alta fiabilidad; además, porque NCTUns provee una interfaz de usuario integrada y profesional, por lo cual es una herramienta catalogada con un alto nivel de interfaz gráfica [80].

Respecto del manejo que requiere la herramienta de simulación, se debe precisar que es necesario un conocimiento previo de tecnologías de red, ya que las implementaciones a

---

<sup>11</sup> Tiempo que toma la ráfaga desde su nodo de origen hasta el nodo destino.



las que está enfocada se orientan a comunicaciones en movimiento (e.g., VANETs y MANETs) [80].

Además, NCTUNS tiene la posibilidad de simular Wimax, VANET, MANET, Internet, Wireless LANS, GPRS Networks, Optical Networks, Personal AP, Real TCP/IP, UDP/IP. También, tiene la característica especial de simular CBR TCP, aplicaciones reales (generando datos reales) [80]. Por último, NCTUNS tiene un limitante: solo se puede implementar en Linux y además las últimas versiones el software no son gratuitas.

#### 4.2.4 OPNET (RIVERBED)

Es una herramienta de simulación orientada a las comunicaciones. Presenta una interfaz amigable para los usuarios, incluyendo librerías de modelos que permiten la familiarización entre el programador y la jerarquía interna del simulador. OPNET (desde el 2012 llamado Riverbed) trabaja internamente con programación de código C++ el desarrollo de los modelos se da a través de la conexión de nodos, compuestos internamente por diferentes módulos y conexiones [81].

Gracias a sus numerosas ventajas y a su poderosa interfaz gráfica, su uso, por parte de grupos académicos es alto, puesto que la manera de simular es muy intuitiva; sin embargo, necesita de gran cantidad de conocimientos previos en redes y programación, además es de licencia comercial [80].

#### 4.2.5 OMNeT++

OMNeT++ es un entorno de desarrollo integrado (IDE, *Integrated Development Environment*) que permite la simulación de redes de cualquier tipo, basado en componentes modulares y con un ambiente de simulación de arquitectura abierta y con un fuerte soporte de GUI (interfaz gráfica de usuario), creado por András Varga en el 2003 en la Universidad Técnica de Budapest. Es un simulador de eventos discretos, su principal aplicación es la simulación de redes de comunicación, y debido a su arquitectura genérica y flexible, ha sido utilizada en redes basadas en colas de espera, arquitectura de hardware, tecnologías móviles, inalámbricas, redes ATM, TCP/IP, redes ópticas, entre otras [80] [82].

Esta herramienta se conforma por módulos escritos en C++ que se comunican entre sí a través de mensajes, donde módulos simples pueden conformar módulos compuestos y los niveles jerárquicos no tienen límites [80]. Los módulos se pueden conectar entre sí a través de puertos y se comunican con el paso de mensajes a lo largo de rutas preestablecidas por las conexiones o directamente a su destino. Las conexiones se pueden utilizar para modelar enlaces físicos con parámetros como la velocidad de datos, tiempo de propagación, tasa de error de bit y tasa de paquetes perdidos [83].

Con respecto al diseño y modelado de la topología de red, OMNeT utiliza el lenguaje NED, lenguaje de alto nivel para la creación de los módulos, con éste se puede definir de una forma sencilla la topología, los canales y sus parámetros, mensajes, conexiones, etc. [55].

Por otro lado, la interfaz gráfica que ofrece la herramienta presenta características de depuración superiores al de otras herramientas; además, OMNET es un simulador con



visualización en línea, lo que permite que los usuarios puedan pausar la simulación e inspeccionar o cambiar los valores de los módulos que conforman una red, cambiar la apariencia de los nodos y datos que arroja como resultado [80].

#### 4.2.6 Resumen de herramientas de simulación

En la Tabla 4.1 se presenta una comparación de las diferentes herramientas de simulación expuestas anteriormente.

Tabla 4.1 Requerimientos analizados sobre las herramientas de simulación. Adaptado de [11] [80].

	NS-2	NS-3	NCTUNS	OPNET	OMNET
Uso investigativo	Alto	Medio	Alto	Alto	Alto
Tipo de licencia	Libre	Libre	Comercial	Comercial	Libre
Plataformas que soporta	Windows, Unix, Mac	Windows, Unix, Mac	Linux	Windows, Unix	Windows, Unix
Interfaz gráfica	Bajo	Medio	Alto	Alto	Medio
Graficación de resultados	No tiene	Aceptable	Aceptable	Buena	Aceptable
Tecnologías de nivel 2 y nivel 3 que soporta	Alto	Medio	Alto	Alto	Alto
Tráfico que permite modelar	Alto	Medio	Alto	Alto	Medio
Implementación de heurísticas	No permite	No permite	No permite	No permite	Permite

Con el fin de simular el comportamiento de una red OBS implementando algoritmos heurísticos RSA y RWA, la herramienta más adecuada, según los datos presentados en la Tabla 4.1 es OMNeT++, ya que es este se caracteriza por ser una herramienta flexible, de licencia libre, que presenta una buena interfaz gráfica pero sobre todo que permite la implementación de heurísticas, algo que las demás herramientas no soportan.

Además de la herramienta software utilizada para la creación de los módulos de la red OBS, es necesario contar con otro tipo de herramientas que permitan realizar gráficas a partir de los resultados obtenidos en la simulación y de esa manera analizar el comportamiento de los algoritmos implementados en la red. A continuación se presentan algunas de las herramientas más utilizadas para la representación de los datos gráficamente, estas son:

- **MATLAB:** es una herramienta de simulación que se utiliza como programa de cálculo matemático muy flexible y potente, tiene la característica de representación de datos gráficamente. Esta herramienta brinda la posibilidad de integrar nuevas funciones gracias a la amplia variedad de módulos con los que cuenta para ejecutar simulaciones de alto grado de complejidad [84].
- **ORIGIN PRO:** es un software científico utilizado ampliamente en el ámbito académico para realizar gráficas de alta calidad. Este software cuenta con



características de diseño avanzado por medio de los cuales se pueden realizar gráficos profesionales como la posibilidad de comparar diferentes datos establecidos, figuras en tercera dimensión (3D), las cuales facilitan el análisis de la información [84].

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, se considera que la herramienta más adecuada para la realización de las gráficas es ORIGIN PRO, debido a que es una herramienta fácil de utilizar y además permite realizar gráficas de alta calidad.

### 4.3 IMPLEMENTACIÓN DE LOS MÓDULOS DE LA RED OBS

Con el fin de implementar una red que cumpla con las características de OBS, se parte de la creación de los módulos simples, con el fin de formar los nodos de frontera (Edge Node) y los nodos centrales (Core Node).

#### 4.3.1 Nodo fuente-destino

El nodo fuente (source), es el encargado de generar los paquetes que se desean transmitir por la red. Además, se encarga de asignar aleatoriamente la dirección de destino y el tipo de información que va ser enviada, las cuales, para este caso son asignadas siguiendo una distribución de probabilidad uniforme. Este módulo cuenta con los siguientes parámetros: dirección de origen, dirección de destino, tamaño de los paquetes (en bytes) y el tiempo de entre la generación de paquetes (en segundos), cuyas variables son declarados en el archivo .ned del módulo y asignadas en el archivo de configuración omnet.ini del proyecto en OMNeT++.

Por otro lado, el nodo de destino (Sink) recibe los paquetes provenientes de la red óptica y es donde se realizan los procesos estadísticos como el cálculo de retardo extremo a extremo de paquetes y el número de paquetes perdidos.

El módulo fuente se agrupa con el modulo destino en un módulo de mayor jerarquía llamado SourceSink como lo muestra la Figura 4.2.

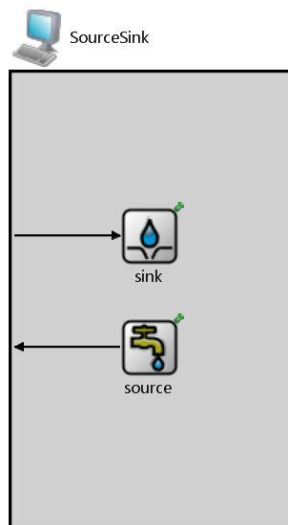


Figura 4.2 Modulo Fuente/Destino en OMNeT++.

### 4.3.2 Nodo Frontera (*Edge Node*)

El nodo borde o frontera de una red OBS es el encargado de realizar las funciones de ensamblado y desensamblado de las ráfagas. El nodo frontera puede ser de ingreso o de egreso; el nodo frontera de ingreso se encarga del recibir los paquetes provenientes de la fuente o redes externas (*Source*), clasificarlos, ensamblarlos en la ráfaga y enviarla, para eso se ha creado un módulo llamado ensamblador (*Assembler*); mientras que el nodo frontera de egreso realiza el proceso de desensamblaje de la ráfaga y entrega los paquetes al destino (*Sink*), para lo cual se ha creado el modulo Desensamblador (*Disassembler*). En la Figura 4.3 se muestra el esquema (en .ned) de los nodos de ingreso y egreso en OMNet++.

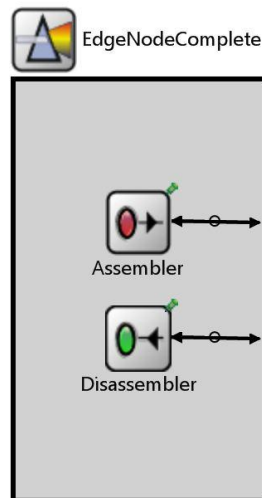


Figura 4.3 Nodo Frontera de ingreso y egreso.

#### 4.3.2.1 Nodo Frontera de Ingreso (*Assembler*)

Como se dijo anteriormente, el nodo frontera de ingreso se encarga del proceso de ensamblaje de la ráfaga de datos, para lo cual se ha creado un módulo (en .ned) compuesto llamado *Assembler*, el cual se compone de tres submódulos: un clasificador (*classifier*), un conformador de ráfagas (*burstifier*) y un planificador de envío (*Sender*), como se muestra en la Figura 4.4.

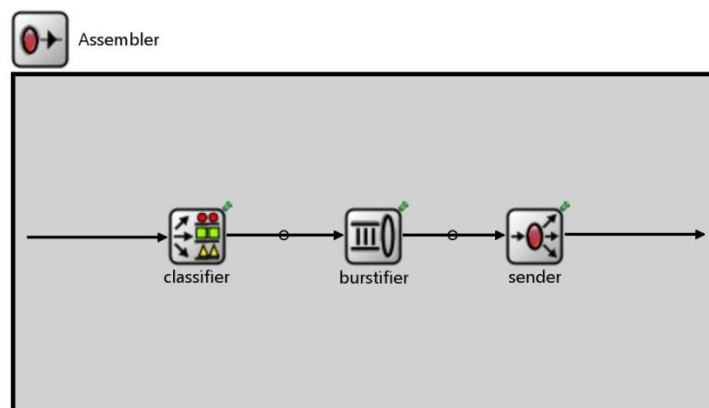


Figura 4.4 Submódulos que conforman el Nodo Frontera.



El clasificador (*Classifier*) recibe los paquetes de datos provenientes de la fuente (*Source*) y los clasifica de acuerdo a su dirección de destino y tipo de servicio y los coloca en una cola de datos. Una vez se haya clasificado los paquetes, estos se ensamblan en una ráfaga de datos en el submódulo conformador de ráfagas (*burstifier*).

El conformador de ráfagas forma la ráfaga con paquetes que tengan la misma dirección de destino y el mismo tipo de servicio. Este proceso depende del algoritmo de ensamble implementado, que para este caso es el algoritmo híbrido, el cual tiene en cuenta tanto la longitud o tamaño de la ráfaga como el tiempo máximo de ensamble. Una vez la ráfaga alcanza el tamaño máximo o se cumpla el tiempo máximo de ensamblaje (lo que primero ocurra), se detiene el proceso de ensamble, se conforma la ráfaga y se envía hacia un submódulo llamado planificador de envío (*Sender*).

Una vez la ráfaga llega al planificador de envío (*Sender*), este se encarga de generar el paquete de control de ráfaga (BCP), generar el tiempo de offset, realizar la reserva de recursos y planificar el envío del BCP y la ráfaga de datos hacia el nodo central. El paquete de control se llena con los siguientes parámetros: diferencia entre el tiempo actual y el tiempo estimado de llegada de la ráfaga, dirección de destino, color de la ráfaga (canal por la que es enviada la ráfaga) y el tamaño de la ráfaga. Por otro lado, la reserva de recursos para la ráfaga se realiza mediante el algoritmo LAUC para la red OBS/WDM y un algoritmo heurístico basado en LAUC (LAUC adaptado) para la red OBS/FlexGrid, con estos algoritmos se busca el canal de datos que se encuentre libre en el menor tiempo. Una vez se tenga un canal de datos disponible para el envío de la ráfaga, se envía el BCP por un canal dedicado (que en este caso corresponde al último) y la ráfaga luego de un tiempo de offset.

#### 4.3.2.2 Nodo Frontera de Egreso (*Disassembler*)

Es el encargado de recibir las ráfagas de datos provenientes de otros nodos de la red, las desensambla en paquetes y estos son entregados a su respectivo destino. En este nodo se realizan los cálculos del número de ráfagas perdidas y el retardo extremo a extremo de ráfagas<sup>12</sup>. En este caso, se ha creado un módulo llamado *Disassembler* como se mencionó anteriormente, el cual se puede observar en la Figura 4.3.

#### 4.3.3 Nodo Central (*Core Node*)

Los nodos de núcleo o centrales permiten la conmutación de las ráfagas de datos de manera transparente sobre la fibra óptica, esto se hace configurando la matriz de conmutación para que cierta ráfaga que llega al conmutador salga por alguna de las interfaces de salida, dependiendo del destino que tenga y el canal de datos sobre el que viaja. Los nodos de núcleo están directamente conectados a los nodos de frontera mediante enlaces de fibra óptica, como se muestra en la Figura 4.5.

Un nodo central está compuesto por cuatro elementos: una interfaz de entrada (*coreInput*), un conmutador óptico (*OXC*), una unidad de control (*ControlUnit*) y una interfaz de salida (*coreOutput*) como se muestra en la Figura 4.6. La interfaz de entrada se encarga de extraer el BCP y la ráfaga de datos; el BCP es enviado a la unidad de

---

<sup>12</sup> El retardo extremo a extremo de ráfagas en el tiempo que estas se tardan en ir del ensamblador origen al desensamblador destino.

control, mientras que la ráfaga es enviada al conmutador óptico sin realizar ningún tipo de conversión. Por otro lado, la unidad de control recibe el BCP, realiza una conversión de óptico a eléctrico (OE) y lo procesa con el fin de configurar el conmutador óptico para la llegada de la ráfaga, luego el BCP se convierte al dominio óptico nuevamente (EO) y es enviado a la interfaz de salida, como se muestra en la Figura 4.7. Así mismo, el conmutador óptico recibe la ráfaga de datos por un puerto de entrada específico y sale por un puerto que ya ha sido configurado por la unidad de control hacia la interfaz de salida. Por su parte la interfaz de salida envía el BCP por el canal dedicado y la ráfaga por su respectivo canal de datos hacia el siguiente nodo.

Además de los módulos explicados anteriormente, el nodo central debe conocer información de enrutamiento para que el conmutador óptico envíe la ráfaga por el puerto adecuado, es por eso que se ha creado un módulo de enrutamiento (*routing*) basado en el algoritmo de dijkstra, explicado en el capítulo 3. De igual manera, la unidad de control debe contar con la información de la asignación de recursos, por lo que se crea el módulo *GatesHorizon* como se muestra en la Figura 4.7.

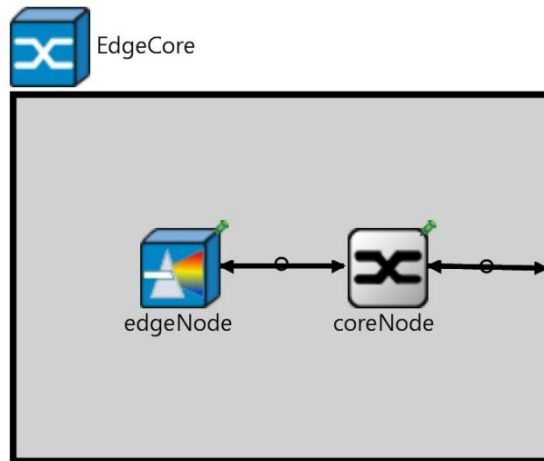


Figura 4.5 Conexión entre el Nodo Frontera y el Nodo Central de una red OBS.

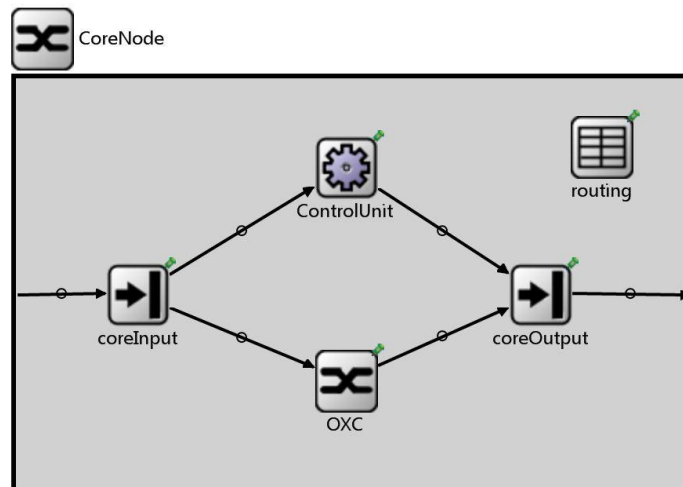


Figura 4.6 Módulos que conforman el Nodo Central.



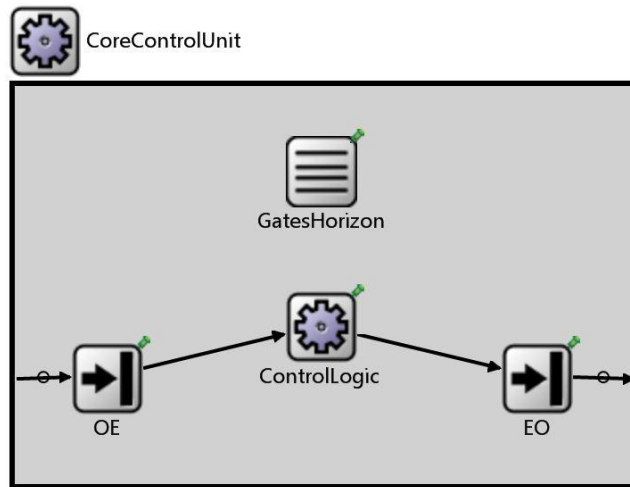


Figura 4.7 Módulos Unidad de control.

#### 4.3.4 Caracterización de la red OBS basada en la topología NSFNeT

Una vez creados cada uno de los módulos básicos de una red OBS como lo son los nodos frontera y los nodos centrales, se procede a caracterizar la red, que para este caso tiene la topología de la NSFNeT (*National Science Foundation Network*).

NSFNeT es una red WAN que conecta 14 ciudades de Estados Unidos de América. La Figura 4.8 muestra la topología de red con sus respectivas distancias físicas entre los nodos. Esta red es de gran importancia ya que la mayoría de pruebas se lleva a cabo sobre esta topología. Igualmente, es una de las topologías de red más empleadas para análisis de desempeño de redes en muchos trabajos de investigación. Esta red posee una topología distribuida irregular con su número de conexiones variables por nodo [11].

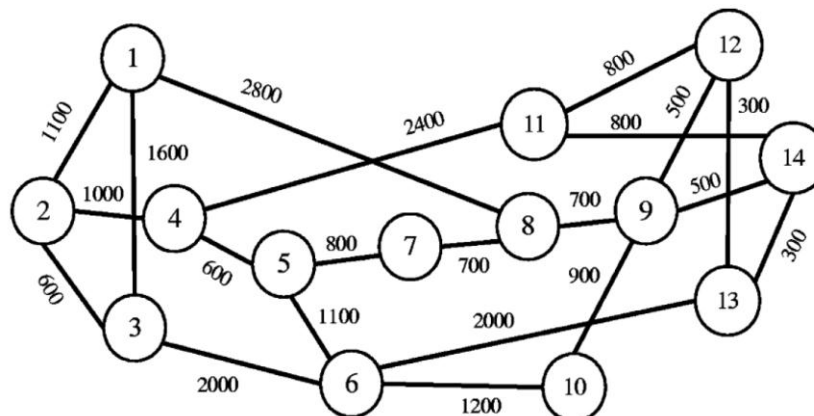


Figura 4.8 Topología NSFNeT. Tomada de [11].

La red explicada anteriormente se modeló en la herramienta de simulación OMNeT++, los módulos creados anteriormente se agrupan en un módulo compuesto (*edgeCore*) y se ubican en la posición de cada nodo predefinidos en el mapa de Estados Unidos y de esa manera formar la topología de la red. La red modelada en la herramienta se muestra en la Figura 4.9.

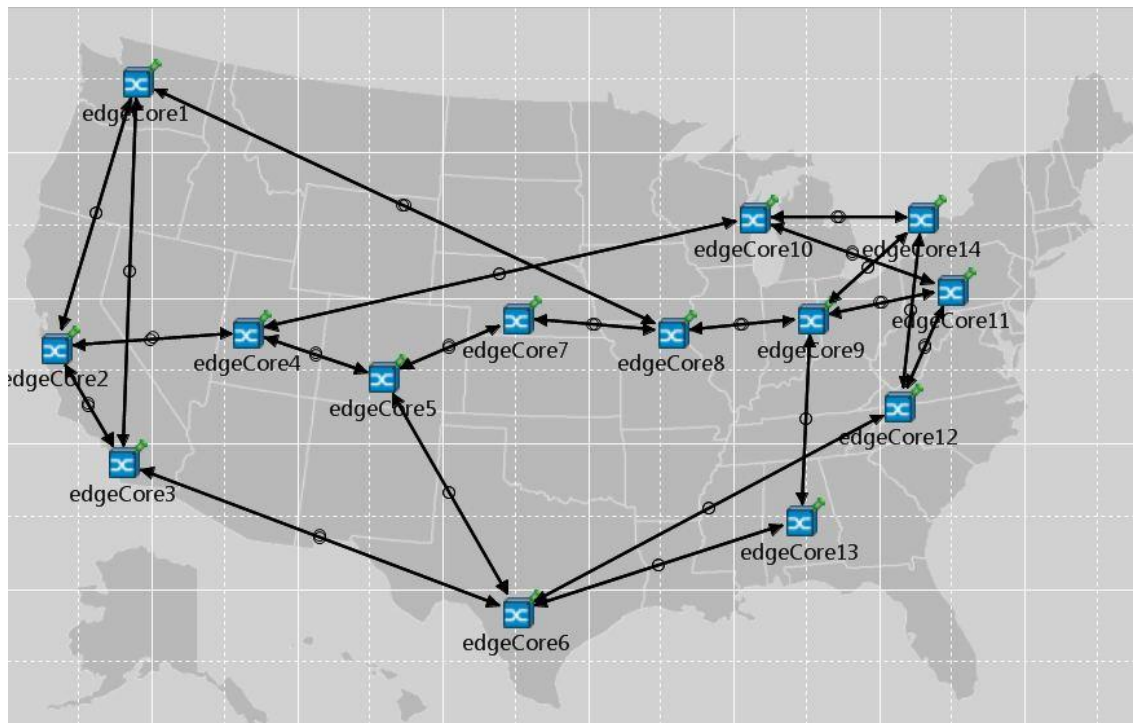


Figura 4.9 Red OBS basada en la topología NSFNET implementada.

#### 4.4 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS ALGORITMOS RWA Y RSA SELECCIONADOS

Como se mencionó en el Capítulo 3, para las redes OBS/WDM y OBS/FlexGrid se implementa el algoritmo de caminos mínimos o algoritmo de Dijkstra para el problema de enrutamiento, ya que es un algoritmo sencillo de implementar y muy reconocido en la literatura. Por otro lado, para el problema de asignación de longitud de onda (en OBS/WDM) se implementa el algoritmo Último Canal Libre Disponible (LAUC) y para la asignación de espectro (en OBS/FlexGrid) un algoritmo heurístico basado en LAUC (adaptado).

##### 4.4.1 Algoritmo de Dijkstra

El algoritmo de Dijkstra hace parte de los grafos ponderados (ver Anexo A). Un grafo es una estructura matemática que consta de nodos y conexiones llamadas aristas, las cuales se encuentran conectadas en sus dos extremos a nodos o posiblemente al mismo nodo en los dos extremos.

El algoritmo de Dijkstra permite determinar la ruta más corta que une los nodos de origen y destino de un grafo. El funcionamiento del algoritmo comienza marcando todos los nodos como no utilizados, asignándolos con distancia de valor infinito relativo. Se parte de un nodo inicial conocido visitando sus nodos adyacentes, como Dijkstra es una técnica voraz, para que un camino sea óptimo utiliza el principio de que todos los caminos contenidos deben ser óptimos, luego entre todos los vértices adyacentes se busca el que se encuentre más cerca al nodo de origen, el cual es tomado como punto intermedio y se evalúa si se puede llegar más rápido desde este nodo a los demás. Después se escoge al



siguiente más cercano y se repite el proceso, esto se realiza hasta que el nodo no utilizado más cercano sea el nodo destino [49] [85] [86]. A continuación se presentan los pasos que sigue el algoritmo de Dijkstra para encontrar el camino más corto entre dos nodos de un grafo según [87]:

Teniendo un grafo dirigido ponderado de  $N$  nodos no aislados, sea  $s$  el nodo inicial, un vector  $D$  de tamaño  $N-1$  guardará al final del algoritmo las distancias desde  $s$  al resto de los nodos [87].

1. Inicializar todas las distancias en  $D$  con un valor infinito relativo ya que son desconocidas al principio, exceptuando la de  $s$  que se debe colocar en 0 debido a que la distancia de  $s$  a  $s$  sería 0.
2. Sea  $a = s$  (tomamos  $a$  como nodo actual).
3. Recorremos todos los nodos adyacentes de  $a$ , excepto los nodos marcados, llamaremos a estos nodos no marcados  $vi$ .
4. Si la distancia desde  $s$  hasta  $vi$  guardada en  $D$  es mayor que la distancia desde  $s$  hasta  $a$ , sumada a la distancia desde  $a$  hasta  $vi$ ; esta se sustituye con la segunda nombrada, esto es: si  $(Di > Da + d(a, vi))$  entonces  $Di = Da + d(a, vi)$ .
5. Marcamos como completo el nodo  $a$ .
6. Tomamos como próximo nodo actual el de menor valor en  $D$  (puede hacerse almacenando los valores en una cola de prioridad) y volvemos al paso 3 mientras existan nodos no marcados.
7. Una vez terminado al algoritmo,  $D$  estará completamente lleno.

A continuación se presenta el pseudocódigo del algoritmo de Dijkstra según [88]:

**DIJKSTRA** (Grafo  $G$ , nodo\_fuente  $s$ )

**Para**  $u \in V[G]$  **hacer**

    distancia[ $u$ ] = INFINITO

    padre[ $u$ ] = NULL

distancia[ $s$ ] = 0

adicionar (cola, ( $s$ ,distancia[ $s$ ]))

**mientras que** cola no es vacía **hacer**

$u$  = extraer\_minimo(cola)

**Para** todos  $v \in$  adyacencia[ $u$ ] **hacer**

**si** distancia[ $v$ ] > distancia[ $u$ ] + peso ( $u, v$ ) **hacer**

            distancia[ $v$ ] = distancia[ $u$ ] + peso ( $u, v$ )

            padre[ $v$ ] =  $u$

            adicionar(cola,( $v$ ,distancia[ $v$ ]))

En la Figura 4.10 se muestra el diagrama de flujo que se toma como base para la implementación del algoritmo de Dijkstra en lenguaje de programación C, mediante la herramienta IDE OMNeT++.

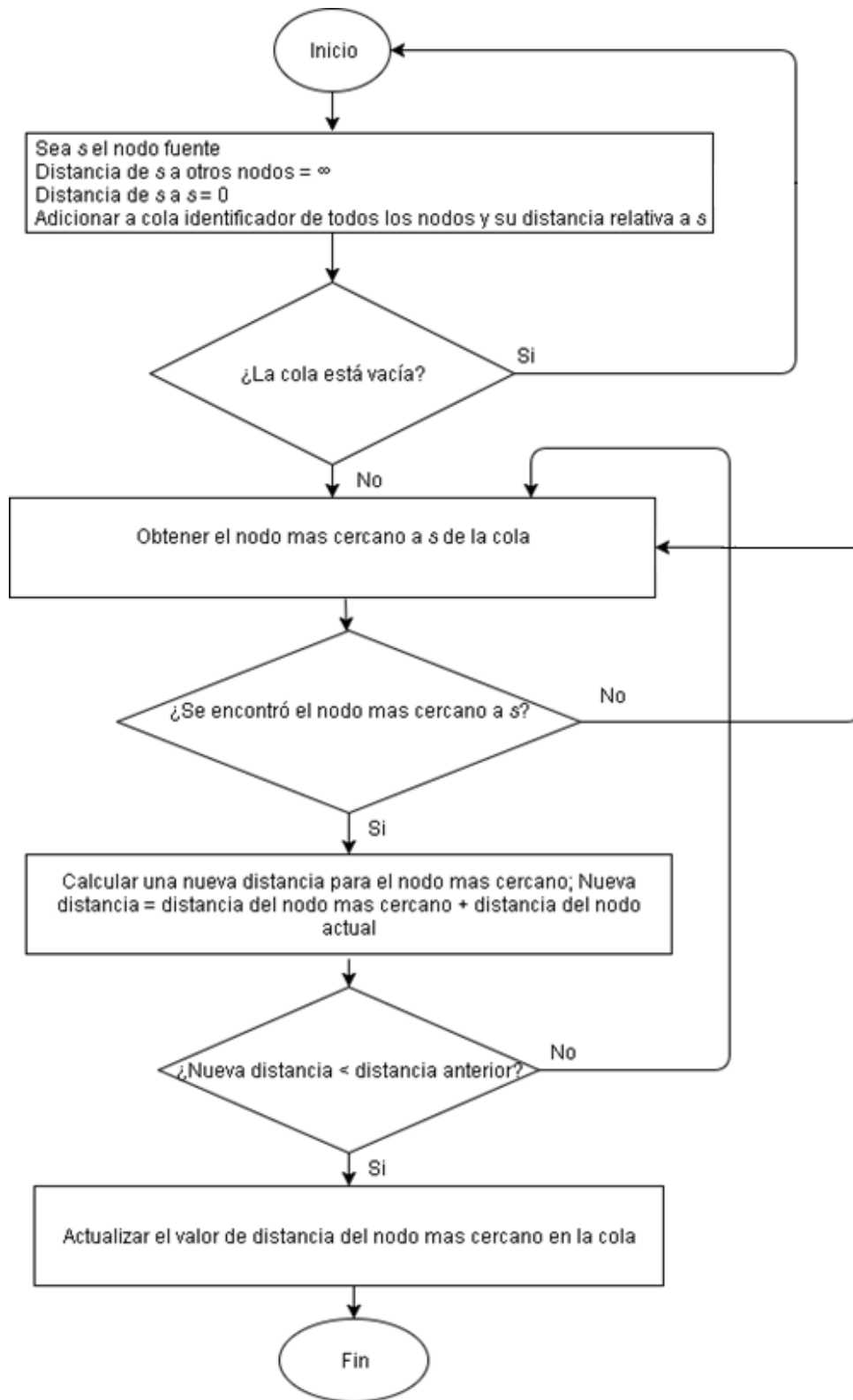


Figura 4.10 Diagrama de Flujo Algoritmo de Dijkstra.



#### 4.4.2 Algoritmo LAUC

El algoritmo Último Canal Libre Disponible (LAUC) es el elegido para realizar el proceso de la asignación de recursos en este trabajo de grado. Este algoritmo es muy similar al algoritmo *Horizon* (ver sección 3.1.5.1). La idea básica del algoritmo LAUC es la de minimizar los huecos seleccionando el canal de datos disponible más reciente para cada ráfaga de entrada. Dado el tiempo de llegada  $t$  de una ráfaga de datos de duración  $L$ , el *scheduler* o planificador primero encuentra el canal de datos de salida que no tiene planificado nada aún (canal a la salida que no tiene ninguna ráfaga planificada después del instante de llegada de la ráfaga de entrada). Si existe al menos un canal que presente estas características, el *scheduler* selecciona el último canal disponible, por ejemplo, el canal que tiene un menor hueco entre  $t$  y el final de la ráfaga de datos justo antes de  $t$ , para llevar la ráfaga de datos que llega. El tiempo sin planificar del canal seleccionado (por ejemplo el tiempo futuro disponible) es actualizado a  $t+L$  [88]. A continuación se presentan los pasos que sigue el algoritmo LAUC en la asignación de canales:

1. Sea *horizon* un vector que guarda los tiempos próximos en los que los canales estarán libres
2. Se Inicializa el vector *horizon* con ceros
3. Si llega una ráfaga de datos, se extrae el canal con el menor tiempo del vector *horizon*
4. Se asigna el canal correspondiente a ese tiempo a la ráfaga de datos
5. Se programa el envío del BCP y la ráfaga de datos
6. Se actualizan los valores del vector *horizon*.

En la Figura 4.11 y 4.12 se observan los diagramas de flujo que se toman como base para la implementación de los algoritmos LAUC para la asignación de longitud de onda (OBS/WDM) y el heurístico-LUC para la asignación de espectro (OBS/FlexGrid), desarrollados en el lenguaje de programación C mediante la herramienta IDE OMNeT++.

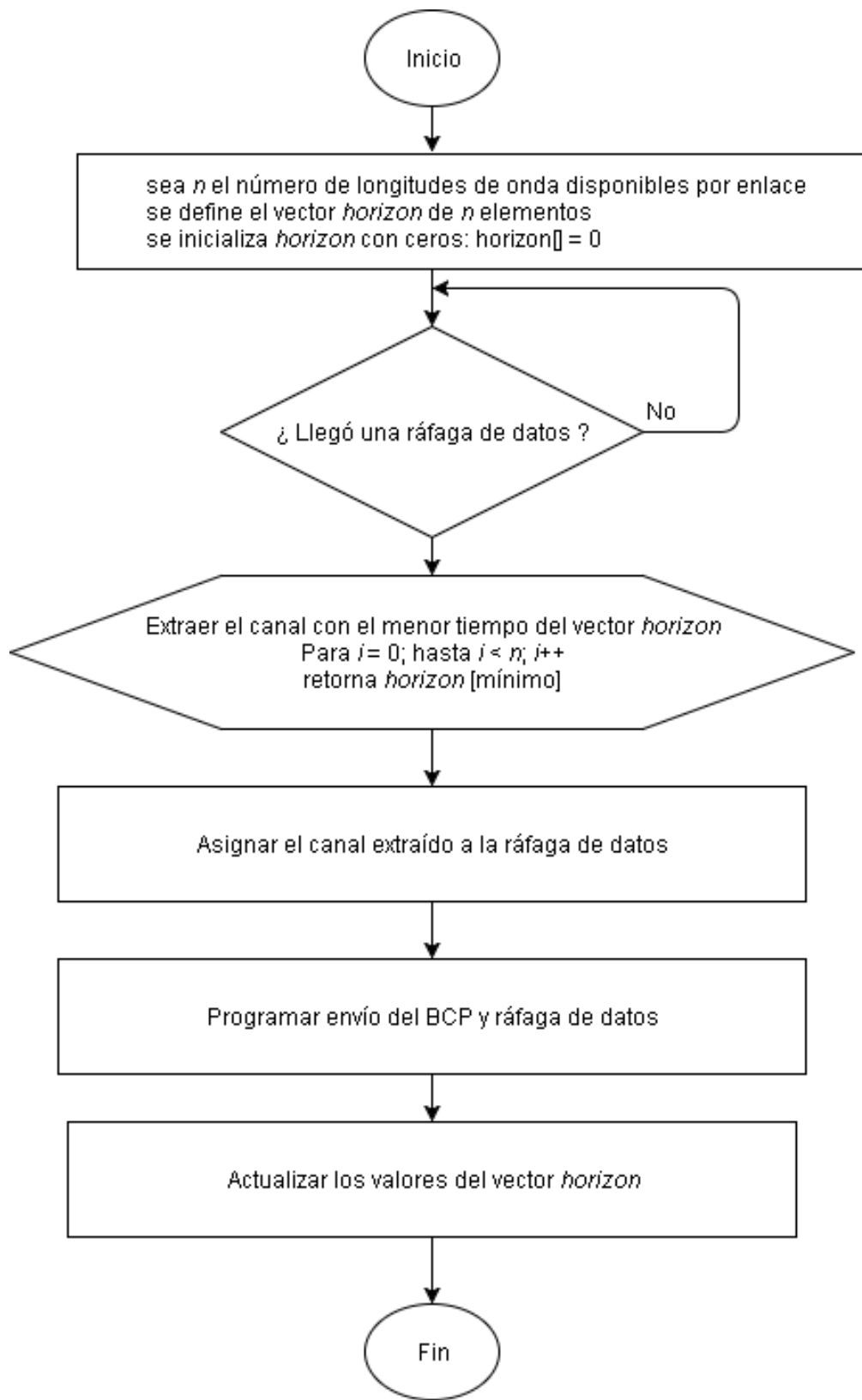


Figura 4.11 Diagrama de Flujo Algoritmo LAUC.

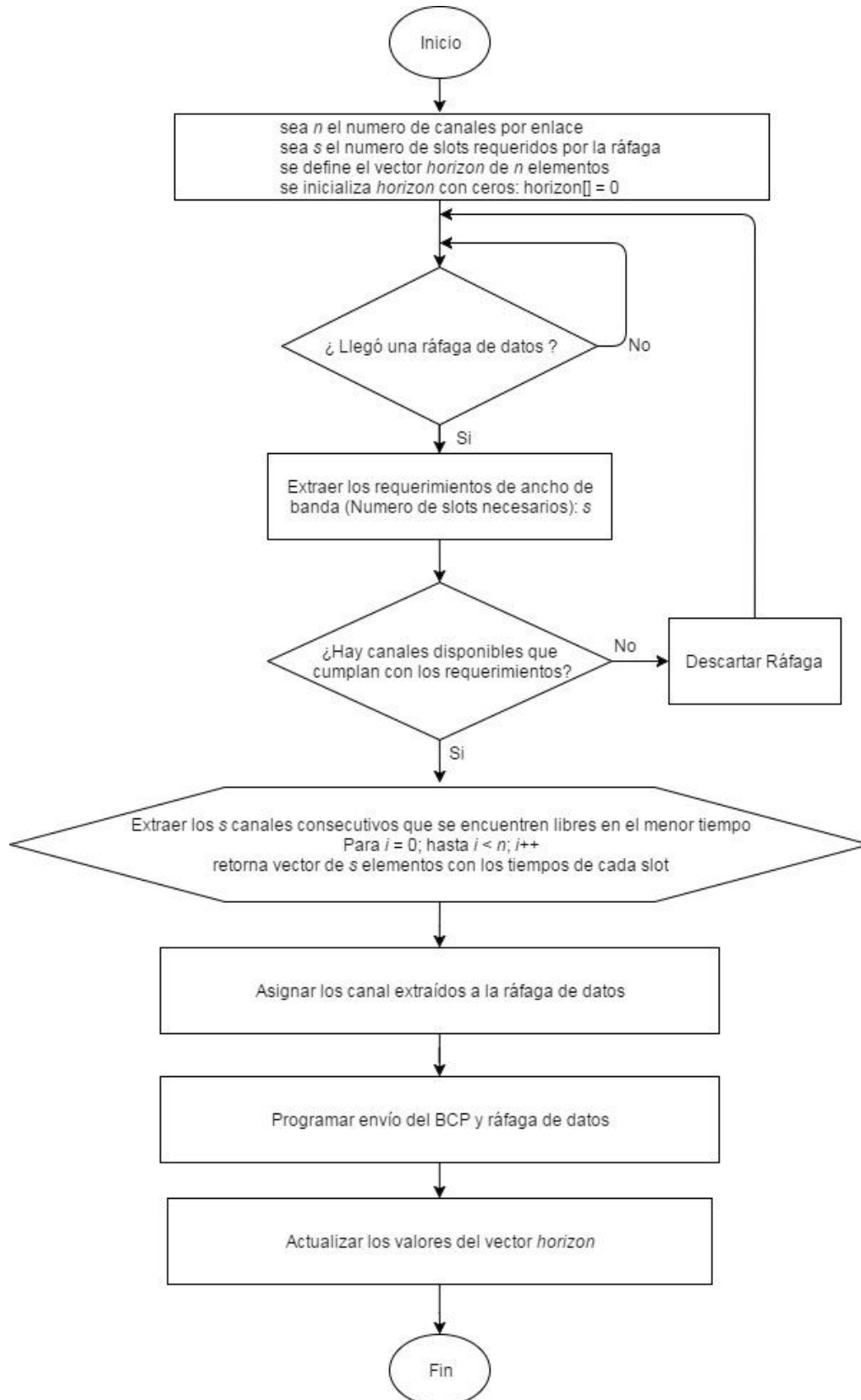


Figura 4.12 Diagrama de Flujo Algoritmo heurístico - LAUC.



Finalmente, es necesario aclarar que en este trabajo de grado se toman como referencia tres tipos de servicio: servicio 1, servicio 2 y servicio 3, cada uno con diferentes requerimientos de ancho de banda que no superan los 50 GHz (ancho de banda de un canal WDM). A continuación se especifican las características de cada servicio:

Características del servicio 1: demanda un ancho de banda correspondiente a 1 slot de frecuencia (12.5 GHz); con capacidades de acceso de 1 y 2.5 Gbps.

Características del servicio 2: demanda dos slots de frecuencia (25 GHz); con capacidades de acceso de 1 y 2.5 Gbps.

Características del servicio 3: demanda 3 slots de frecuencia (37.5 GHz), con capacidades de acceso de 1 y 2.5 Gbps.

Además, para cada servicio se debe garantizar la mínima relación señal a ruido (SNR) la cual depende de parámetros como: potencia de transmisión del canal, sensibilidad del receptor y tipo de fibra, los cuales no son tomados en cuenta en este trabajo de grado.





## CAPÍTULO 5: ESCENARIOS DE SIMULACIÓN Y PRUEBAS

### 5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen los escenarios de simulación definidos para el estudio del desempeño de la red NSFNET OBS en términos de la probabilidad de bloqueo de ráfagas<sup>13</sup> y el retardo extremo a extremo<sup>14</sup> implementando algoritmos RWA (WDM) y RSA (FlexGrid) para dar solución al problema de enrutamiento y asignación de recursos.

Un escenario de simulación hace referencia a la configuración inicial de las características y parámetros de la simulación. En este caso se caracteriza las redes NSFNET OBS/WDM y OBS/FlexGrid, en las cuales se configuran parámetros como el número de canales (lambdas para WDM y slots para FlexGrid), el protocolo de señalización y el tipo de algoritmo de enrutamiento y asignación de recursos y la velocidad de transmisión de los enlaces, como se presenta en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Escenario y casos de simulación.

Escenarios de simulación			
Escenario: Topología de red NSFNET			
Casos de simulación			
Caso 1		Caso 2	
Red NSFNET OBS/WDM implementando LAUC en la asignación de longitud de onda		Red NSFNET OBS/FlexGrid implementando algoritmo heurístico basado en LAUC para la asignación de espectro	
Sub casos de simulación			
Sub caso 1		Sub caso 2	
JET, Dijkstra, espectro disponible de 100 GHz (2 $\lambda$ para WDM y 8 slots para FlexGrid)		JET, Dijkstra, espectro disponible de 200 GHz (4 $\lambda$ para WDM y 16 slots para FlexGrid)	
Sub caso 1.1	Sub caso 1.2	Sub caso 2.1	Sub caso 2.2
Velocidad de 1 Gbps	Velocidad de 2.5 Gbps	Velocidad de 1 Gbps	Velocidad de 2.5 Gbps

### 5.2 CASOS DE SIMULACIÓN

Para el estudio de este trabajo de grado se generaron dos casos de simulación con el fin de analizar el desempeño de los algoritmos RWA y RSA sobre la misma topología de red óptica, y de esa manera comparar la eficiencia de las dos tecnologías de redes ópticas planteadas como temas de investigación (WDM y FlexGrid).

<sup>13</sup> Probabilidad de bloqueo =  $\frac{\text{Número de Ráfagas Perdidas}}{\text{Número de Ráfagas Totales}}$

<sup>14</sup> El retardo extremo a extremo de ráfagas es el tiempo que tarda la ráfaga desde que es ensamblada en el nodo origen hasta el momento en que llega al desensamblador del nodo destino.



### **5.2.1 Caso 1: Red NSFNet OBS/WDM implementando LAUC en la asignación de longitud de onda**

En este caso, se caracteriza una red óptica OBS soportada sobre WDM, implementando el algoritmo de Dijkstra para el enrutamiento y LAUC para la asignación de longitud de onda.

### **5.2.2 Caso 2: Red NSFNet OBS/FlexGrid implementando algoritmo heurístico basado en LAUC para la asignación de espectro**

En este caso, se caracteriza una red óptica OBS soportada sobre FlexGrid, implementando el algoritmo de Dijkstra para el enrutamiento y un algoritmo heurístico basado en LAUC para la asignación de espectro.

### **5.2.3 Sub casos de simulación**

#### **Sub caso 1**

Se configuró las redes OBS/WDM y OBS/FlexGrid con el protocolo de reserva de recursos JET, el algoritmo de Dijkstra para el enrutamiento, el algoritmo LAUC para la asignación de longitud de onda en WDM y un algoritmo heurístico basado en el LAUC para la asignación de espectro en FlexGrid. Para este sub caso se configuran las redes con 2 longitudes de onda para OBS/WDM y 8 slots para OBS/FlexGrid, teniendo en cuenta que se han definido espaciamientos entre canales de 50 GHz para WDM (basándose en la recomendación G.694.1 de la ITU-T) y 12.5 GHz para FlexGrid (Según información encontrada en [2], [3], [8]), obteniéndose para este sub caso un espectro disponible de 100 GHz para cada red.

#### **Sub caso 2**

En este caso, las redes continúan con los mismos algoritmos del sub caso 1, pero se varía el número de canales de datos para cada una de ellas, esto con el fin de ver el efecto de variar el número de canales disponibles en el desempeño de la red. Para la red OBS/WDM se utilizan 4 longitudes de onda y para OBS/FlexGrid 16 slots, es decir que en este sub caso aumenta el espectro disponible en la red de 100 a 200 GHz respecto del sub caso 1. Esto se realiza con el fin de observar el desempeño de las redes al aumentar la cantidad de espectro disponible.

#### **Sub casos 1.1 y 2.1:**

Se configuran las redes de los sub casos 1 y 2 con una velocidad de transmisión de los enlaces de 1 Gbps.

#### **Sub casos 1.2 y 2.2:**

Se configuran las redes de los sub casos 1 y 2 con una velocidad de transmisión de los enlaces de 2.5 Gbps.



Las variaciones de velocidad de transmisión de los enlaces se realizan con el fin de observar el comportamiento de los algoritmos implementados en las redes al aumentar o disminuir la velocidad.

### 5.3 PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN PARA LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

En esta sección se identifican las variables que afectan tanto de manera directa como indirectamente el desempeño de la red y de igual manera los resultados de las simulaciones. En las Tablas 5.2 y 5.3 se presentan los parámetros configurados en las redes OBS/WDM y OBS/FlexGrid respectivamente para las diferentes pruebas de simulación.

Tabla 5.2 Parámetros de configuración implementados en la red OBS/WDM.

Parámetro	Nombre de la variable en OMNeT ++	Valores o intervalos
Cantidad de espectro disponible	NA	100 GHz
		200 GHz
Número de longitudes de onda	lambdasCore	2 $\lambda$
		4 $\lambda$
Espaciamiento entre canales	NA	50 GHz
Velocidad de transmisión	dataRate	1 Gbps
		2,5 Gbps
Longitud de paquete	packetLength	1472 Bytes
Tiempo de procesamiento BCP	BCPProcessingDelay	10 $\mu$ s
Tiempo de procesamiento de conmutador óptico	OXCDelay	10 $\mu$ s
Tiempo de guarda	guardTime	1 ns
Tiempo offset	minOffset	20 $\mu$ s
	maxOffset	50 $\mu$ s
Tamaño mínimo de la ráfaga	minSizePadding	8 Bytes
Número máximo de paquetes por ráfaga	numPackets	3
Tiempo máximo de ensamble	maxTime	0,005 s

Tabla 5.3 Parámetros de configuración implementados en la red OBS/FlexGrid.

Parámetro	Nombre de la variable en OMNeT ++	Valores o intervalos
Cantidad de espectro disponible	NA	100 GHz
		200 GHz
Número de slots	numSlots	8
		16
Espaciamiento entre canales	NA	12,5 GHz
Velocidad de transmisión	dataRate	1 Gbps
		2,5 Gbps



Longitud de paquete	packetLength	1472 Bytes
Tiempo de procesamiento BCP	BCPProcessingDelay	10 $\mu$ s
Tiempo de procesamiento de conmutador óptico	OXCDelay	10 $\mu$ s
Tiempo de guarda	guardTime	1 ns
Tiempo offset	minOffset	20 $\mu$ s
	maxOffset	50 $\mu$ s
Tamaño mínimo de la ráfaga	minSizePadding	8 Bytes
Número máximo de paquetes por ráfaga	numPackets	3
Tiempo máximo de ensamble	maxTime	0,005 s

Por otro lado, los nodos de la red fueron configurados para generar diferentes granularidades o densidades de tráfico variando el parámetro tiempo entre paquetes (sendlaTime en OMNeT++) y de esa manera observar el comportamiento de la red al someterse a flujos de tráfico alto, medio y bajo. El parámetro sendlaTime esta modelado por una función exponencial, donde el argumento de la función toma valores entre 4.1 y 5  $\mu$ s (con intervalos de 0.1  $\mu$ s), siendo 4.1  $\mu$ s el valor para modelar tráfico alto, 4.5  $\mu$ s el valor de tráfico medio y 5  $\mu$ s para tráfico bajo. Estos valores son elegidos con base en pruebas realizadas y a fin de que los resultados de la simulación sean aptos para realizar un buen análisis.

Para llevar a cabo las diferentes pruebas de simulación se utilizaron 4 equipos de cómputo en los que se instaló la herramienta IDE OMNeT++ versión 4.6. En la Tabla 5.4, se describen las especificaciones técnicas de los equipos utilizados en la ejecución de las simulaciones.

Tabla 5.4 Especificaciones técnicas de los equipos utilizados.

Equipo	Procesador	Memoria RAM	Disco Duro	Sistema Operativo
Toshiba S55 A5279	Intel Core i7	8 GB	1000 GB	Windows 8.1, 64 bits
DELL Optiplex 7010	Intel Core i7	8 GB	500 GB	Windows 10, 64 bits
DELL Inspiron 620s	Intel Core i5	4 GB	1000 GB	Windows 7, 64 bits
Lenovo	AMD A10	8 GB	1000 GB	Windows 10, 64 bits

#### 5.4 EJECUCIÓN DE LAS SIMULACIONES

Una vez configurada las redes con los parámetros de las Tablas 5.2 y 5.3, se procede a ejecutar las simulaciones sobre la herramienta IDE OMNeT++, para lo cual se realizaron 160 pruebas de simulación por cada caso, distribuidas de la siguiente manera: 2 simulaciones (una por cada canal, que puede ser lambda para WDM o slot para FlexGrid) a 10 valores de tráfico normalizado (0.1 a 1 Erlang), cada una de ellas con tiempos de



simulación de: 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8 segundos, y a velocidades de datos de 1 y 2.5 Gbps, obteniéndose de esa manera las 160 simulaciones. Cabe resaltar que 0.8 segundos de simulación corresponde como mínimo a 6 horas reales, dependiendo de la capacidad del equipo utilizado, por lo que es recomendable utilizar la mayor cantidad de equipos de cómputo simultáneamente para ahorrar tiempo.

Finalmente, los modelos de red implementados permiten obtener los parámetros de desempeño como probabilidad de bloqueo de ráfagas y retardo extremo a extremo, los cuales son exportados hacia la herramienta elegida para la representación de los datos gráficamente ORIGIN PRO 8.6 y de esa manera realizar el análisis respectivo.

## 5.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos y el análisis respectivo de las pruebas de simulación de las redes NSFNET OBS/WDM y OBS/FlexGrid con la implementación de los algoritmos seleccionados. Ver Tabla 5.1.

### 5.5.1 Simulación caso 1 y 2, Sub caso 1

Se simularon las redes en la herramienta IDE OMNeT++ donde se realizaron las configuraciones necesarias para la implementación de los modelos de red OBS/WDM y OBS/FlexGrid con los algoritmos seleccionados, los cuales se presentaron en los casos de simulación. Ver Tabla 5.1.

Para los casos de simulación 1 y 2 que corresponden a las redes NSFNET OBS/WDM y OBS/FlexGrid respectivamente, se implementaron los algoritmos Dijkstra para enrutamiento y JET para señalización; mientras que para la asignación recursos se ha implementado el algoritmo LAUC en OBS/WDM (asignación de longitud de onda) y el algoritmo heurístico basado en LAUC para OBS/FlexGrid (asignación de espectro).

Además, el sub caso 1 especifica un espectro disponible para los enlaces de 100 GHz, que corresponden a 2 lambdas para WDM (caso 1: espaciamentos de canal de 50 GHz) y 8 slots para FlexGrid (caso 2: espaciamentos de canal de 12.5 GHz). De igual manera, los sub caso 1.1 y 1.2 especifican las velocidades de transmisión de 1 y 2.5 Gbps, con el fin de realizar pruebas al variar la velocidad. La Tabla 5.5 muestran los parámetros que permanecen fijos durante la ejecución de la simulación.

Tabla 5.5 Parámetros Fijos de simulación, sub caso 1.

Parámetro	Red OBS/WDM	Red OBS/FlexGrid
Algoritmo de señalización	JET	JET
Algoritmo de enrutamiento	Dijkstra	Dijkstra
Algoritmo de Asignación de recursos	LAUC	Heurístico basado en LAUC
Número de canales por enlace	2 (lambdas de 50 GHz)	8 (slots de 12.5 GHz)
Velocidad de los enlaces	1 y 2.5 Gbps	1 y 2.5 Gbps
Tiempo de simulación	0.8 s	0.8 s

Tanto para la configuración que implementa el algoritmo RWA como para el RSA, se varía el tráfico en la red, el cual ha sido normalizado (valores de 0.1 a 1 Erlang, con intervalos de 0.1), se procede a realizar las gráficas de los parámetros de desempeño y su respectivo análisis.

Las Figuras 5.1 y 5.2 muestran los resultados obtenidos al simular las redes OBS/WDM y OBS/FlexGrid con 2 y 8 canales respectivamente y a una velocidad del enlace de 1 Gbps (a) y 2.5 Gbps (b), en las cuales se puede observar que a medida que aumenta el tráfico en las redes, la probabilidad de bloqueo y el porcentaje de ráfagas perdidas en ambas se incrementa, esto se debe a que al aumentar el tráfico, la asignación de recursos en la red es cada vez más compleja. Sin embargo, se puede observar que la red OBS/FlexGrid presenta un mejor desempeño que la red OBS/WDM en términos de probabilidad de bloqueo, esto debido a que esta aprovecha de mejor forma el espectro disponible, siendo el mismo para ambas redes (100 GHz), pero mejor utilizado por FlexGrid ya que utiliza canales de 12.5 GHz en vez de 50 GHz como lo hace WDM (según ITU-T G.694.1).

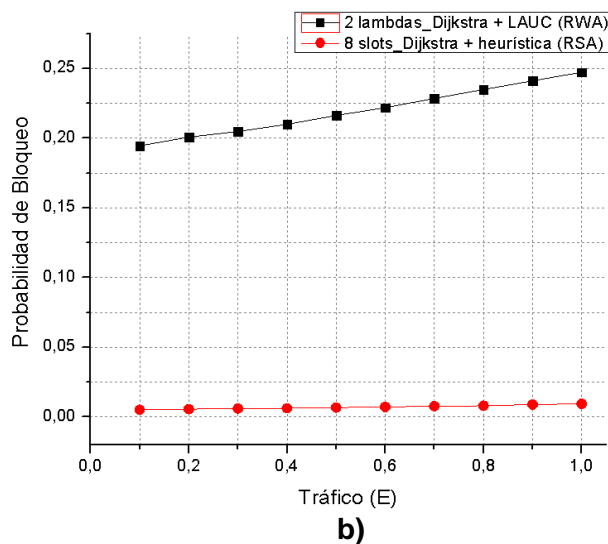
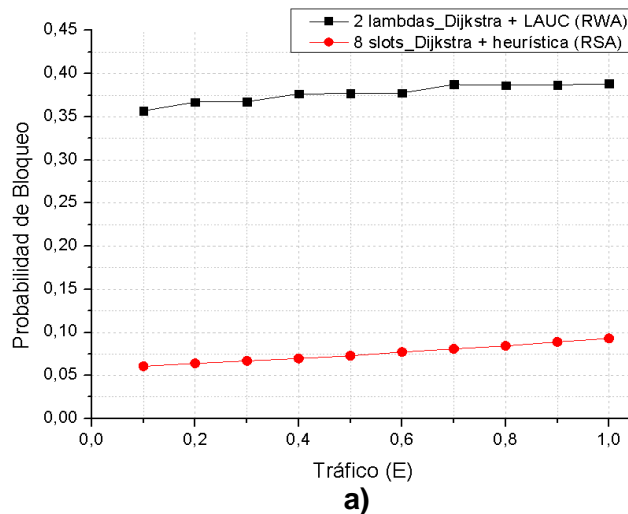
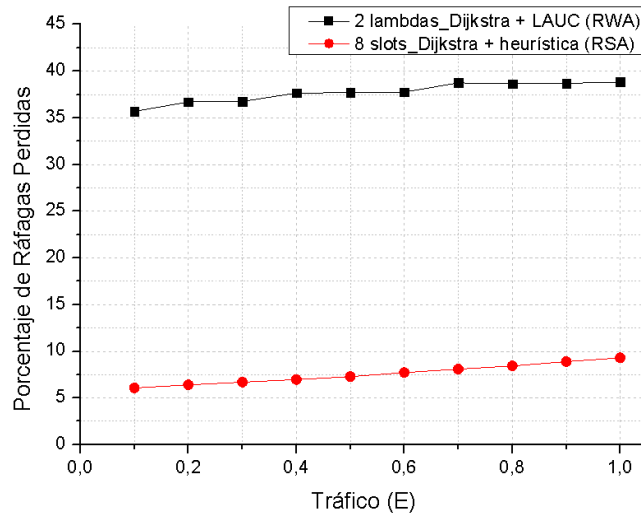
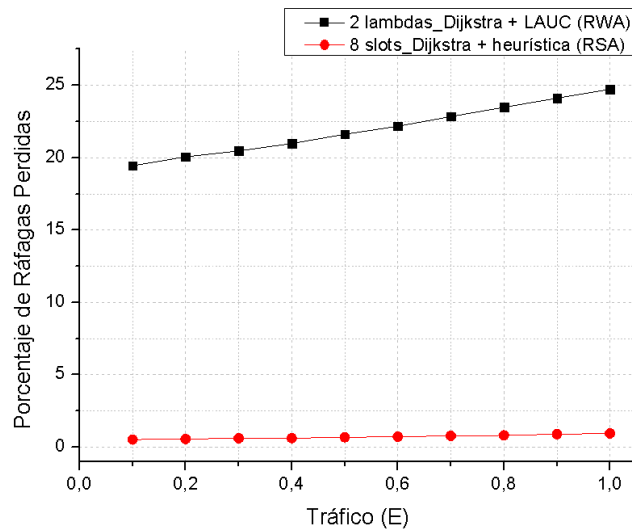


Figura 5.1 Probabilidad de bloqueo vs Tráfico. a) 1 Gbps b) 2.5 Gbps.



a)



b)

Figura 5.2 Porcentaje de ráfagas perdidas vs Tráfico. a) 1 Gbps b) 2.5 Gbps.

En cuanto al efecto de variar la velocidad de transmisión de los enlaces (sub casos 1.1, 1.2, 2.1 y 2.2), las Figuras 5.3 y 5.4 permiten analizar el desempeño de las redes cuando se manejan velocidades de 1 y 2.5 Gbps. En estas se puede observar que para velocidades mayores se obtienen mejores respuestas en cuanto a probabilidad de bloqueo, ya que el tiempo de transmisión de una ráfaga entre dos nodos se define como el cociente entre el tamaño de la ráfaga sobre la velocidad de transmisión (en bits), lo cual implica que a mayores velocidades de transmisión de los enlaces, la ráfaga tarda un menor tiempo en viajar por los caminos ópticos, logrando de esa manera disminuir la congestión en la red y por ende el número de ráfagas perdidas.

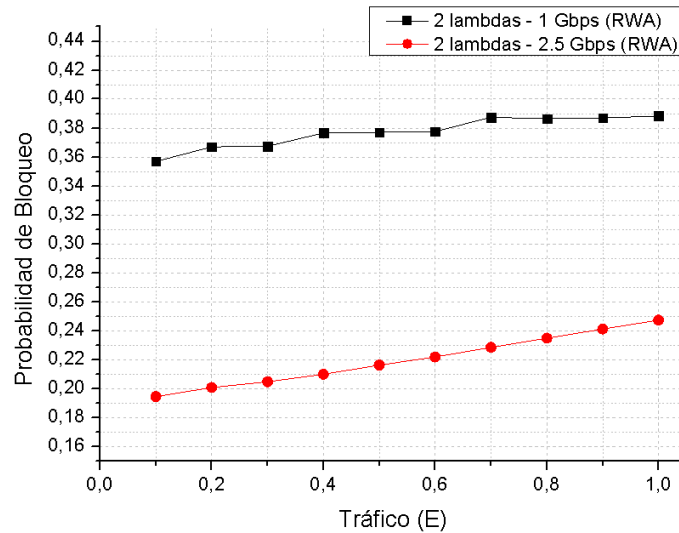


Figura 5.3 Probabilidad de bloqueo red NSFNET OBS/WDM, 1 y 2.5 Gbps.

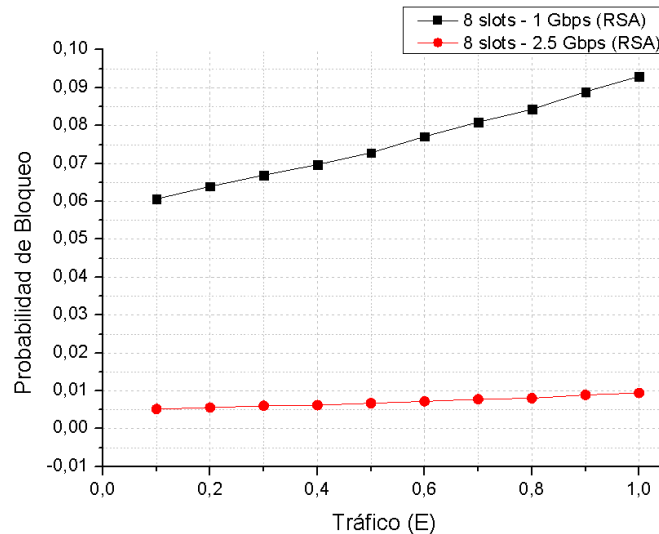
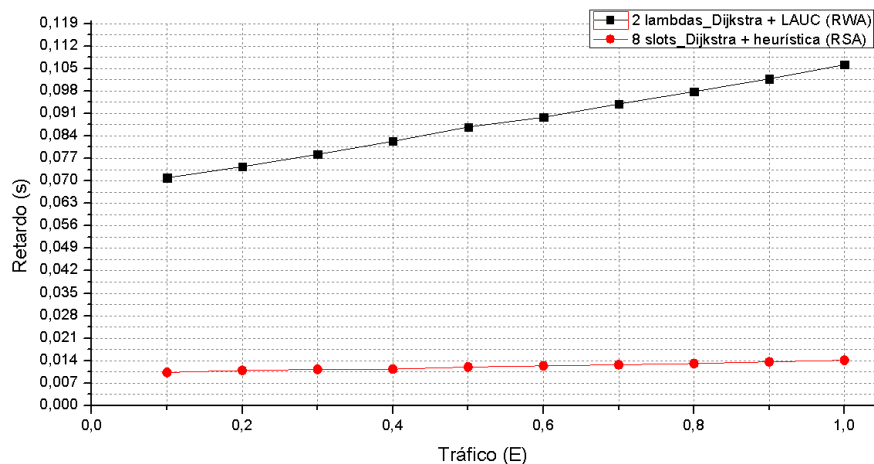


Figura 5.4 Probabilidad de bloqueo red NSFNET OBS/FlexGrid, 1 y 2.5 Gbps.

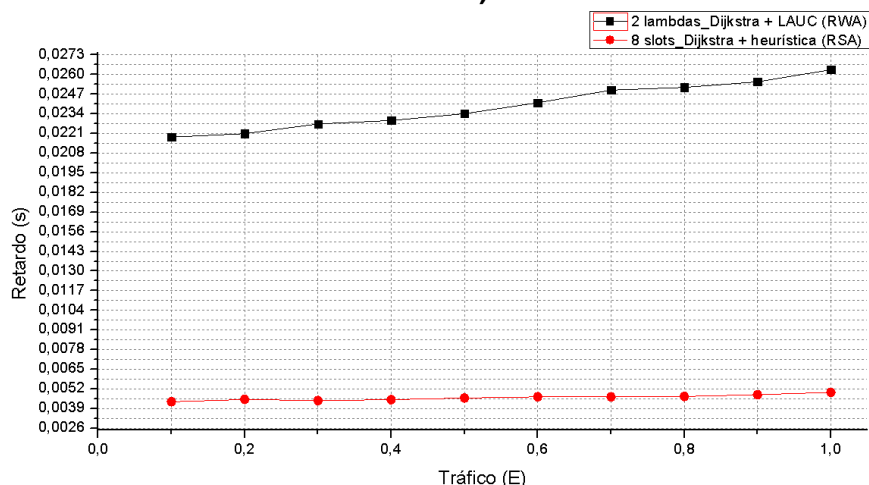
Otro de los parámetros de desempeño medidos en este trabajo de grado es el retardo extremo a extremo de ráfagas, el cual se define como el tiempo que tarda la ráfaga desde que es ensamblada en el nodo origen hasta el momento en que llega al desensamblador del nodo destino. Como se puede observar en la Figura 5.5, el retardo extremo a extremo de ráfagas también se incrementa a medida que el tráfico en las redes aumenta, al igual que la probabilidad de bloqueo, esto se da porque al aumentar el número de ráfagas en las colas de los planificadores de envío, los recursos en la red se van agotando de igual manera y las ráfagas tendrán que esperar más tiempo para ser transmitidas, incrementado el retardo. Sin embargo, la red OBS/FlexGrid presenta un mejor comportamiento ya que el retardo tiende a mantenerse constante a medida que aumenta el tráfico, esto debido a que esta cuenta con un mayor número de canales disponibles que la red OBS/WDM (más recursos disponibles debido a una asignación de espectro más eficiente) y por lo tanto las ráfagas que llegan a los planificadores van a tener mayores



posibilidades de ser enviadas en el menor tiempo posible, obteniéndose de esa manera un mejor desempeño en la red.



a)



b)

Figura 5.5 Retardo extremo a extremo vs Tráfico. a) 1 Gbps b) 2.5 Gbps.

Las gráficas presentadas anteriormente permiten visualizar que la red OBS/FlexGrid, la cual implementa algoritmos RSA tiene un mejor comportamiento en cuanto a probabilidad de bloqueo y retardo extremo a extremo que la red OBS/WDM. Su principal razón es la eficiencia con la que se asigna el espectro disponible, aprovechándolo al máximo, es por esa razón que diferentes estudios en la literatura proyectan a FlexGrid como la tecnología del futuro en la implementación de redes ópticas de alta capacidad.

Ahora es tiempo de ejecutar las simulaciones al variar el número de canales disponibles en cada una de las redes y de esa manera observar su comportamiento (Sub caso 2).

### 5.5.2 Simulación caso 1 y 2, Sub caso 2

Se simularon las redes OBS/WDM y OBS/FlexGrid (caso 1 y caso 2) con lo especificado en el sub caso 2. El sub caso 2 especifica el espectro disponible para los enlaces de 200 GHz, que corresponden a 4 lambdas para WDM (caso 1: espaciamentos de canal de 50



GHz) y 16 slots para FlexGrid (caso 2: espaciamientos de canal de 12.5 GHz). La tabla 5.6 presenta los parámetros con los que se configuró las redes y los cuales permanecen fijos durante la ejecución de la simulación.

*Tabla 5.6 Parámetros Fijos de simulación, sub caso 2.*

Parámetro	Red OBS/WDM	Red OBS/FlexGrid
Algoritmo de señalización	JET	JET
Algoritmo de enrutamiento	Dijkstra	Dijkstra
Algoritmo de Asignación de recursos	LAUC	Heurístico basado en LAUC
Número de canales por enlace	4 (lambdas de 50 GHz)	16 (slots de 12.5 GHz)
Velocidad de los enlaces	1 y 2.5 Gbps	1 y 2.5 Gbps
Tiempo de simulación	0.8 s	0.8 s

Se realizaron las simulaciones variando el tráfico en la red, el cual es normalizado, es decir que varía entre 0.1 y 1 Erlang, donde 0.1 representa el tráfico más bajo y 1 el tráfico más alto. Una vez ejecutadas las simulaciones, se extraen los datos correspondientes a los parámetros de desempeño y se procede a realizar las gráficas con el fin de hacer el análisis respectivo.

Como se puede observar en las Figuras 5.6 y 5.7, la probabilidad de bloqueo y el porcentaje de ráfagas perdidas presentan un comportamiento similar a las pruebas ejecutadas con los parámetros del sub caso 1, aumentando a medida que se incrementa el tráfico en las redes como es de esperar; sin embargo, en el sub caso 2, la probabilidad de bloqueo y el porcentaje de ráfagas perdidas disminuyen respecto a las pruebas del sub caso 1, debido a que se aumenta el espectro disponible en las redes, lo que implica un mayor número de canales disponibles para la transmisión de las ráfagas.

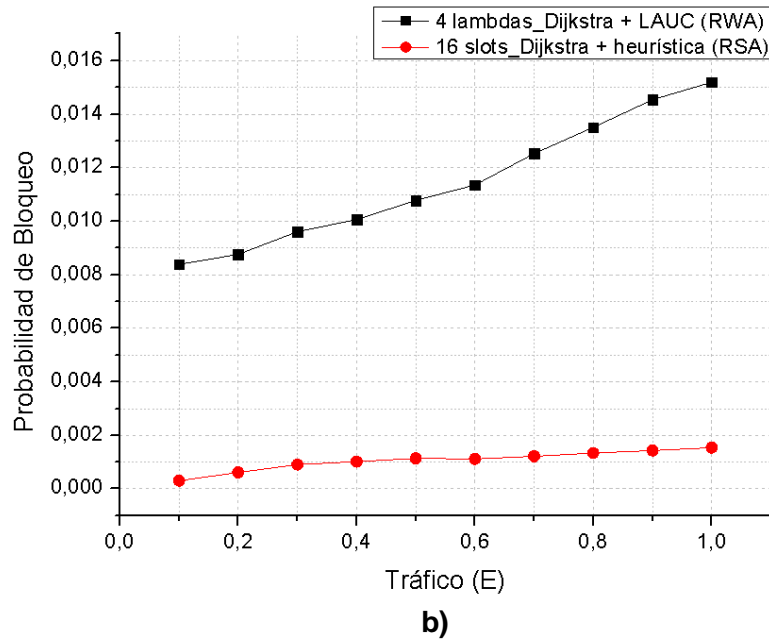
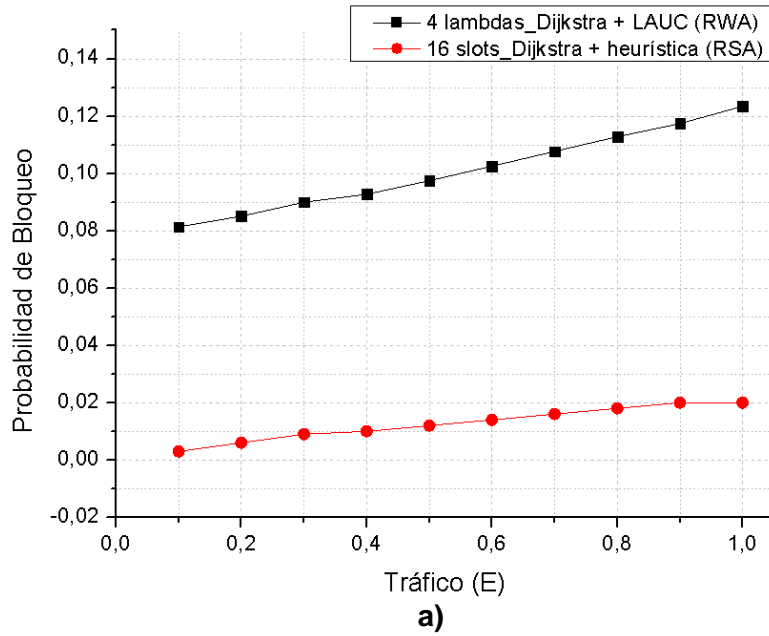


Figura 5.6 Probabilidad de bloqueo vs Tráfico. a) 1 Gbps b) 2.5 Gbps

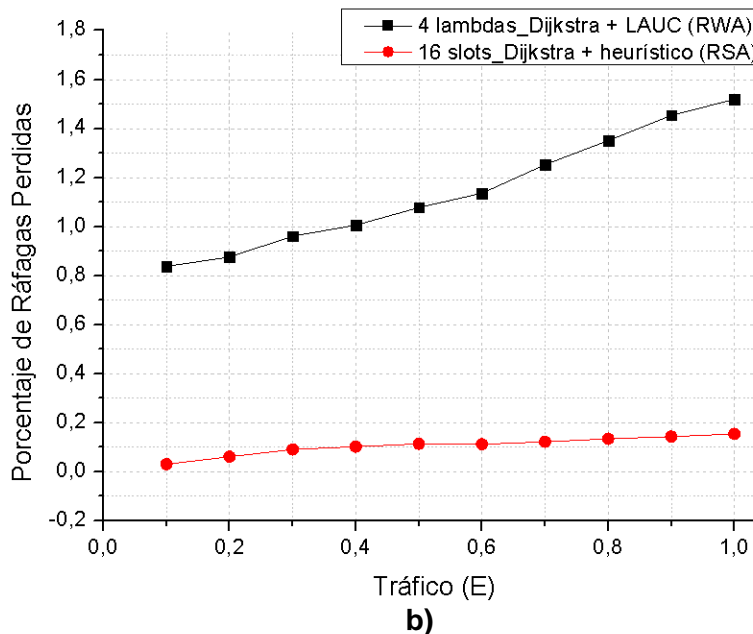
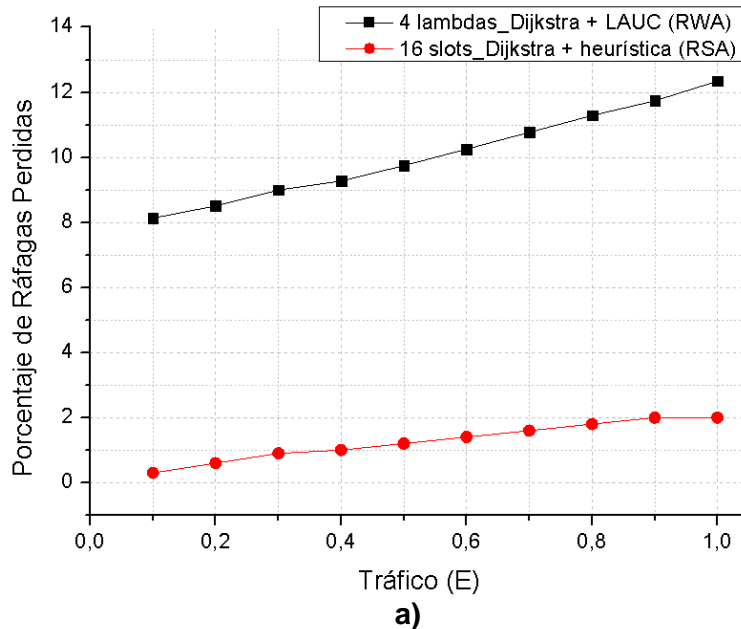


Figura 5.7 Porcentaje de Ráfagas Perdidas vs Tráfico. a) 1 Gbps b) 2.5 Gbps.

Respecto al retardo extremo a extremo de ráfagas, se puede observar en la Figura 5.8 que este aumenta al incrementar el tráfico en las redes, sin embargo, la red que implementa algoritmos RSA (OBS/FlexGrid) presenta un mejor desempeño en términos de retardo, ya que este no sufre cambios abruptos (como en RWA), manteniéndose prácticamente constante alrededor de los 4.1 ms a 1 Gbps (Figura 5.8a) y 3.72 ms a 2.5 Gbps (Figura 5.8b). Además, según estos datos, al variar la velocidad de 1 Gbps a 2.5 Gbps, el retardo disminuye en un 10%, esto debido a que a mayores velocidades de transmisión de los enlaces, la ráfaga tarda un menor tiempo en viajar por los caminos ópticos, logrando de esa manera menores retardos.

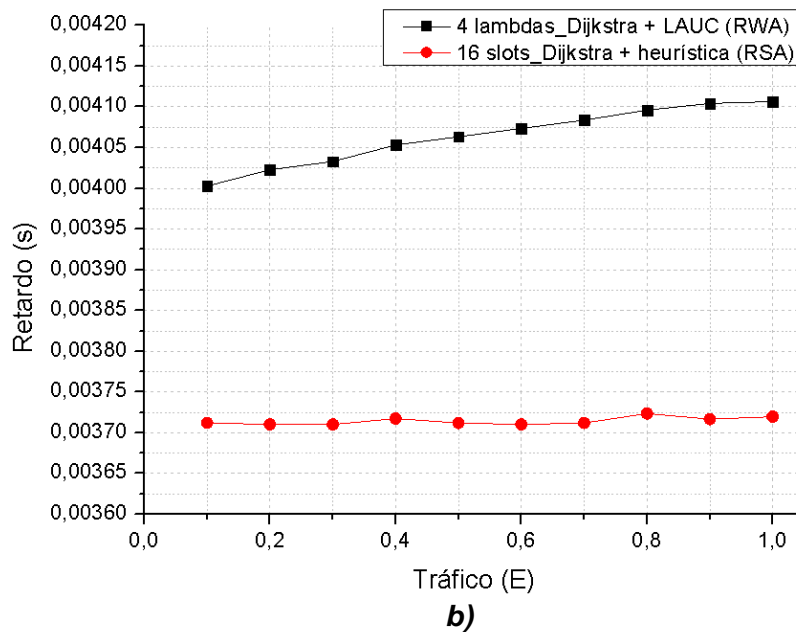
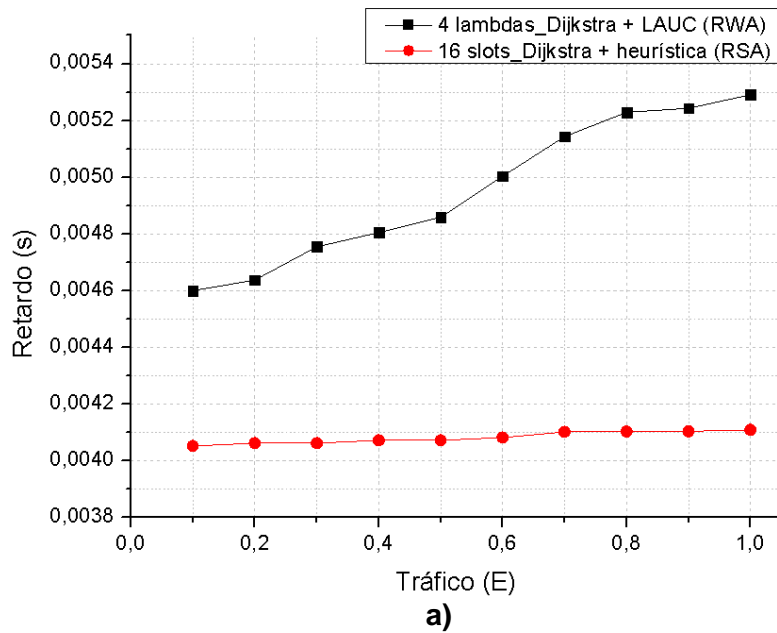


Figura 5.8 Retardo extremo a extremo vs Tráfico. a) 1 Gbps b) 2.5 Gbps.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas para los casos 1 y 2, se puede observar que el comportamiento de la red al implementar algoritmos RSA mejora respecto de la que implementa RWA en la misma topología de red y con las mismas características. Esto se debe a que el algoritmo RSA es mucho más flexible que el RWA en la asignación del espectro y por tanto permite atender a muchas más solicitudes simultáneamente, lo que se traduce en un menor número de ráfagas perdidas. Las Figuras 5.9 y 5.10 presentan el número de ráfagas generadas (por la fuente),



recibidas (por el destino) y perdidas, en la red NSFNET al implementar algoritmos RWA y RSA con una velocidad de transmisión de 1 Gbps y 2.5 Gbps respectivamente.

En la Figura 5.9 se puede observar que la fuente genera la misma cantidad de ráfagas para ambas redes (OBS/WDM y OBS/FlexGrid) en el tiempo de simulación de 0.8 s, sin embargo, el número de ráfagas perdidas es mayor en la red que implementa el algoritmo RWA (OBS/WDM), esto se debe a que esta presenta una probabilidad de bloqueo y un retardo extremo a extremo más alto como se explicó anteriormente, lo que causa que mayor número de ráfagas se pierdan, ya sea porque no hay recursos disponibles para su transmisión o porque el retardo es tan alto que supera el tiempo de *offset* y por tanto la ráfaga es descartada.

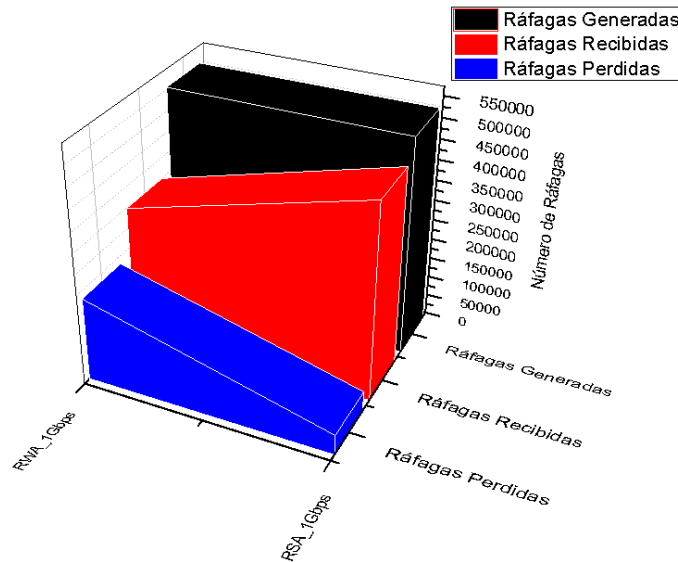


Figura 5.9 Ráfagas Generadas, Recibidas y Perdidas, 1 Gbps.

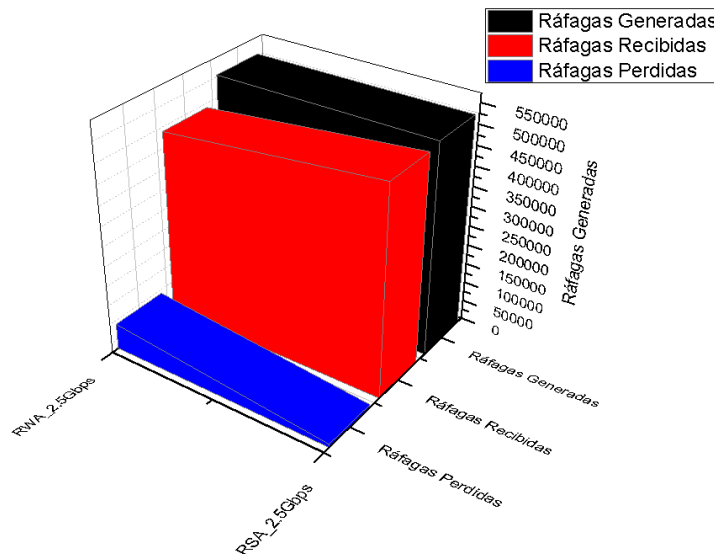


Figura 5.10 Ráfagas Generadas, Recibidas y Perdidas, 2.5 Gbps.



De igual manera, la Figura 5.10 muestra el total de ráfagas en las redes al aumentar la velocidad de transmisión a 2.5 Gbps. En esta se puede observar que el número de ráfagas perdidas disminuye considerablemente en ambos casos (RWA y RSA) y por tanto hay un mayor número de ráfagas que logran llegar a su destino.

Finalmente, la Tabla 5.7 presenta una síntesis de los resultados obtenidos en los casos y sub casos de simulación, esto con el fin de resumir lo analizado anteriormente en cada uno de ellos.

Tabla 5.7 Síntesis de los resultados de simulación.

	RWA				RSA			
	2 $\lambda$ (100 GHz)		4 $\lambda$ (200 GHz)		8 slots (100 GHz)		16 slots (200 GHz)	
	1 Gbps	2.5 Gbps	1 Gbps	2.5 Gbps	1 Gbps	2.5 Gbps	1 Gbps	2.5 Gbps
Probabilidad de Bloqueo Promedio (%)	37,7201	21,9948	10,1047	1,1472	7,5835	0,7123	1,1702	0,1063276
Retardo extremo a extremo Promedio (s)	0,088245	0,02392	0,004955	0,004062	0,012188	0,004623	0,00408	0,003714
Número de Ráfagas Perdidas	104552	64083	30870	3673	23204	2287	3876	365

En la Tabla 5.7 se observa una comparación del desempeño en términos de la probabilidad de bloqueo y el retardo extremo a extremo de los algoritmos implementados (RWA y RSA) sobre la red OBS NSFNET, al variar el número de canales disponibles en los enlaces y la velocidad de transmisión sobre un tráfico constante normalizado de 1 Erlang. En esta se puede observar que la red que implementa el algoritmo RSA presenta una probabilidad de bloqueo más baja que la que implementa RWA en todo sentido, por ejemplo, tomando el caso de que el espectro disponible sea de 100 GHz (2  $\lambda$  en RWA y 8 slots en RSA) y la velocidad de transmisión de 1 Gbps, la probabilidad de bloqueo en la red que implementa RSA disminuye de un 37.42% (en RWA) a 7.58%, es decir un decremento del 79.75%. De igual manera, para el caso de que el espectro disponible sea de 200 GHz (4  $\lambda$  en RWA y 16 slots en RSA) y se mantenga la velocidad de transmisión (1 Gbps), la probabilidad de bloqueo en la red que implementa RSA disminuye de un 10.10% (en RWA) a 1.17%, es decir un decremento del 88.42%. Además, si se varía la velocidad de transmisión de 1 Gbps a 2.5 Gbps, el decremento en la probabilidad de bloqueo es del 96.78% para el caso de 100 GHz y 90.74 % para el caso de 200 GHz de espectro disponible.

Para el caso del retardo extremo a extremo, es posible observar que este es más bajo en la red que implementa RSA para cada caso de simulación, esto se debe a que RSA siempre cuenta con mayor número de canales que RWA, manteniendo la misma cantidad de espectro disponible y la misma velocidad de transmisión. Igualmente, si se aumenta la



velocidad de transmisión, el retado extremo a extremo disminuye aún más ya que las ráfagas de datos viajan a mayor velocidad.

Además, la Tabla 5.7 presenta una estadística de las ráfagas perdidas en cada una de las redes para cada sub caso de simulación, esto con el fin de identificar los escenarios que presentar mejores resultados. En esta es posible observar que el mejor caso se presenta al simular la red que implementa el algoritmo RSA con 200 GHz de espectro disponible y a una velocidad de 2.5 Gbps, obteniéndose un total de 365 ráfagas perdidas de 529576 ráfagas generadas. Mientras que el peor caso se presenta en la red que implementa el algoritmo RWA con 100 GHz de espectro disponible y una velocidad de 1 Gbps, obteniéndose un total de 104552 ráfagas perdidas.





## CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros que surgen del desarrollo del trabajo de grado. Las conclusiones se presentan respecto a los resultados de simulación, al desarrollo del trabajo de grado y a la herramienta de simulación. Las recomendaciones abarcan aspectos relacionados a la metodología del trabajo y a la herramienta de simulación. Finalmente, los trabajos futuros se presentan respecto a las redes OBS/FlexGrid.

### 6.1 CONCLUSIONES

#### 6.1.1 Respecto a los resultados de simulación

- Bajo las condiciones establecidas en los procesos de configuración, simulación de las redes ópticas y de acuerdo a los resultados obtenidos, la red óptica que implementa el algoritmo RSA tiene un mejor desempeño que la red que implementa el RWA, al presentar los valores más bajos de probabilidad de bloqueo y retardo extremo a extremo de ráfagas.
- Los dos modelos de redes ópticas (OBS/WDM y OBS/FlexGrid) tienen un desempeño mejor cuando son expuestas a bajas cantidades de tráfico; sin embargo, para un tráfico alto en las redes, la red OBS/FlexGrid se comporta mucho mejor al introducir menores número de ráfagas perdidas y menores retardos punto a punto.
- El desempeño de las redes ópticas (OBS/WDM y OBS/FlexGrid) tiene una estrecha relación con la velocidad de transmisión en los enlaces, ya que al aumentar la velocidad de transmisión, la probabilidad de bloqueo y el retardo extremo a extremo de ráfagas en ambas redes disminuye, esto se debe a que la ráfaga tarda un menor tiempo en viajar por los caminos ópticos y por lo tanto se presenta menor congestión en la red.
- De acuerdo a los resultados obtenidos, el aumento de espectro disponible en las redes afecta positivamente el desempeño de las mismas, ya que el número de canales disponibles también aumenta; sin embargo, la red OBS/FlexGrid presenta un desempeño más alto, debido a que realiza una asignación de recursos más eficiente.
- Con la implementación del algoritmo LAUC – adaptado para abordar el problema de asignación de espectro, se logró comprobar que las redes FlexGrid tienen un mejor desempeño que las redes WDM cuando se mantiene la misma cantidad de recursos.

#### 6.1.2 Respecto al desarrollo del Trabajo de Grado

- Este trabajo de grado se caracteriza por ser un aporte para el desarrollo de proyectos de investigación que surgen a partir de este, ya que el tema de las redes OBS soportadas sobre FlexGrid no ha sido tenido en cuenta en proyectos anteriores en la Universidad del Cauca, ni en otras Universidades de Colombia.



- Uno de los inconvenientes que surgieron en el desarrollo de este trabajo de grado, se presentó en el momento de la ejecución de las simulaciones, donde se ejecutó inicialmente la simulación del modelo de red OBS/WDM, para lo cual se eligieron valores de tráfico con los cuales se obtuvieron resultados que pudieron ser analizados gráficamente de manera clara; sin embargo, estos valores de tráfico al ser utilizados sobre el modelo de red OBS/FlexGrid, condujo a que no se obtuvieran resultados concluyentes (cantidades muy pequeñas), por lo que se tuvo que elegir nuevamente valores de tráfico que permitieran el análisis comparativo de los parámetros de desempeño en los dos modelos de red de manera clara y concluyente.
- Otro inconveniente que surgió en el desarrollo de este trabajo de grado, se presentó al momento de la elección del tiempo offset durante el diseño de la red y ejecución de las simulaciones, ya que este parámetro es un factor importante al optimizar los recursos disponibles y disminuir la pérdida de ráfagas, independientemente del modelo de red o los algoritmos utilizados.

### 6.1.3 Respecto a la herramienta de simulación

- OMNeT++ se considera como una elección acertada en cuanto a las características que brinda para la construcción de modelos de simulación. Sin embargo es una herramienta con una curva de aprendizaje alta, ya que exige un conocimiento en programación orientada a objetos en C++ y requiere de un proceso de familiarización fuerte.
- La versión 4.6 de OMNeT++ para Windows, la cual fue utilizada para realizar el modelado de las redes, presenta problema de inestabilidad y bloqueo cuando se corre a grandes tiempos de simulación (tiempos superiores a 1.5 segundos), lo cual es una limitante cuando el parámetro variable es el tiempo. Debido a esto, en este trabajo de grado, todas las simulaciones se realizaron a 0.8 segundos de simulación, así que no se tuvo ese inconveniente.
- La herramienta para la realización de las gráficas ORIGIN PRO 8.6 fue una buena elección, ya que esta presenta gran flexibilidad y facilidad de uso. Además, es una herramienta que permite diferentes formas de representar los datos según las necesidades del usuario y exportar las gráficas realizadas en alta calidad.

## 6.2 RECOMENDACIONES

- El IDE OMNet++ es una herramienta robusta que consume gran cantidad de recursos, por lo que se recomienda el uso de equipos de cómputo de alta capacidad (procesador Intel Core i7 o AMD A10 y memoria RAM de 8GB o más) para evitar problemas de bloqueo y exceso de tiempo en la simulación.
- Antes de ejecutar las simulaciones es importante adoptar y aplicar una metodología de simulación que permita realizar de manera organizada este proceso, esto con el objetivo de lograr menor complejidad, mayor claridad y una correcta implementación de los sistemas a simular.



- El uso de OMNeT++ presenta una complejidad elevada, por lo que se recomienda un entrenamiento previo en lenguaje de programación C++ con el fin de facilitar la implementación de los módulos.
- En el proceso de diseño e implementación de los módulos, es recomendable ir documentando cada paso que se sigue con el fin de tener una base del conocimiento para posteriores etapas del proyecto.

### 6.3 TRABAJOS FUTUROS

Con el desarrollo de este trabajo de grado, surgen nuevas propuestas de investigación, tales como:

- Analizar el desempeño de OBS/FlexGrid al implementar técnicas de asignación de espectro semielástico y elástico (analizados en la sección 3.3.2), ya que en este trabajo de grado se usó la técnica de asignación fija.
- Analizar el desempeño de diferentes algoritmos RSA en una red óptica centralizada, ya que en este trabajo de grado se utilizó un modelo de red distribuido.
- Analizar el impacto de usar velocidades de transmisión superiores a los 10 Gbps en el desempeño de redes OBS/FlexGrid, ya que en este trabajo se realizaron pruebas con velocidades bajas (1 y 2.5 Gbps).
- Analizar el desempeño de OBS/FlexGrid utilizando heurísticas y metaheurísticas usadas en RWA para adaptarlos y dar solución al problema de enrutamiento y asignación de espectro (por ejemplo: algoritmos basados en colonia de hormigas, algoritmos genéticos, etc.).
- Realizar una abstracción de una red FlexGrid a nivel físico mediante la herramienta OMNeT++, con el fin de realizar mediciones y análisis de eficiencia espectral.
- Analizar el desempeño de OBS/FlexGrid al implementar otras técnicas usadas en el ensamble de ráfagas (basadas en longitud y tiempo).



## REFERENCIAS

- [1] I. Kaminow, T. Li, y A. Willner, "Optical Fiber Telecommunications V: Components and Subsystems," Editorial Academic Press, 2010, pp. 438-454, 2010.
- [2] A. Garcia, "Elastic Spectrum Allocation in Flexgrid Optical Networks," Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, España, 2012.
- [3] A. de Lerma, "Algoritmos de planificación para redes elásticas," Tesis de pregrado, Universidad autónoma de Madrid, Madrid, España, 2013.
- [4] G. Zhang, M. De Leenheer, A. Morea y B. Mukherjee, "A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 15, no 1, pp. 65-87, 2013.
- [5] M. Ruiz, O. Pedrola, L. Velasco, D. Careglio, J. Fernández-Palacios, y G. Junyent, "Survivable IP/MPLS-Over-WSON Multilayer Network Optimization," *Journal of Optical Communications and Networking*, White Paper, 2011.
- [6] M. Ruiz, L. Velasco, A. Lord, D. Fonseca, M. Pioro, R. Wessaly y J. Fernandez, "Planning Fixed to Flexgrid Gradual Migration: Drivers and Open Issues," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 52, no 1, 2014.
- [7] N. Germen, "Modelos estadísticos de vulnerabilidad para el diseño de redes ópticas dinámicas," Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, España, Junio de 2014.
- [8] P. Sayyad, "Dynamic Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Network," Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, España, Febrero de 2014.
- [9] S. Fernandez, "Simulación y optimización de redes ópticas elásticas: Estudio tecno-económico," Tesis de Pregrado, Universidad de Valladolid, Valladolid, España, Enero de 2015.
- [10] J. G. López Perafán, et al, "Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM", *Revista Facultad de Ingeniería*, ISSN 0121-1129, Vol.20, No. 31, pp. 23-35, Jul-Dic, 2011.
- [11] H. Zang, J. Jue & B. Mukherjee, "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks," *Optical networks magazine*, vol. 1, no 1, pp. 47-60, 2000.
- [12] C. Fernández, "Modelización y resolución del problema de diseño de redes ópticas elásticas multicapa con fallos," Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, España, Junio de 2014.
- [13] A. Bragg, I. Baldine, & Stevenson, "A transport layer architectural framework for optical burst switched (OBS) networks," In *Proceedings of the First International Workshop on Optical Burst Switching*, 2003.



- [14] A. Tanenbaum and D. Wetherall, *Redes de computadoras*, 1st ed. México [etc.]: Pearson Educación, 2012.
- [15] Leiserson, C. et al. *Introduction to Algorithms*. 3rd. ed. Montreal, Toronto: McGraw-Hill Book Company, 2009.
- [16] S. Chagas, "*Uma Abordagem Distribuída para o Problema de Roteamento e Alocação de Comprimentos de Onda em Redes WDM*", Tesis de doctorado, Universidad de Brasilia, Brasilia, Brasil, 2010.
- [17] J. Jue y Vokkarane, "Optical Burst Switched Networks (Optical Networks), Springer Science+Bussines Media," New York, USA, 2006.
- [18] N. Hernández, "Análisis de opciones tecnológicas de modulación y multiplexación en la redes ópticas de 100 Gbps," Tesis de Pregrado, Universidad central de las villas, Santa clara, Cuba, 2011.
- [19] G. Andrade, "Estudio de la Tecnología de conmutación óptica por ráfagas OBS y análisis de migración de redes ópticas pasivas a esta tecnología," Tesis de Pregrado, Departamento de eléctrica y electrónica, Escuela Politécnica del Ejercito, Sangolqui, Ecuador.
- [20] O. I. Gaxiola, "Simulador de un sistema de comunicación óptico empleando multicanalización por división de longitudes de onda (WDM)," Tesis Maestría en Ciencias con Especialidad en Sistemas Digitales, Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital, Instituto Politécnico Nacional, Tijuana, México, Junio de 2005.
- [21] ITU-T, "ITU-T G.694.1: Spectral Grids For WDM Applications: DWDM Frequency Grid," 2012.
- [22] ITU-T, "ITU-T G.694.2: Spectral grids for WDM applications: CWDM Wavelength Grid," 2003.
- [23] J. Pinto, C. Pinheiro Machado, M. Portes y N. Alves, "DWDM em Redes Metropolitanas," Nota Técnica do CBPF-NT001/02, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- [24] W. Mostert y D. Emms, "O Band WDM Expand Capacity without adding new fiber," *Communications Technology*, vol. 25, pp. 46, 2008.
- [25] H. Orozco y W. Trujillo, "Multiplexación por división de longitud de onda (WDM)," *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*, Vol. 1, no 18.
- [26] Métodos de monitoreo en los sistemas DWDM (Parte 1), [En Línea]. Disponible en: <http://ic-line.ua/dwdm-glava1>.



- [27] ITU-T "ITU-T G.652 ITU-T: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable," 2009.
- [28] M. Tena, "Evaluación de Arquitecturas de Red Híbridas OBS/OCS," Tesis de Pregrado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de Barcelona, Barcelona, España, 2009.
- [29] The Fiber Optic Association, "*Guide To Fiber Optics & Premises Cabling*". [En Línea], Disponible en: <http://www.foaguide.org>.
- [30] Z. Ding, Z. Xu, X. Zeng, T. Ma, F. Yang, "Hybrid routing and spectrum assignment algorithms based on distance-adaptation combined coevolution and heuristics in elastic optical networks," *Optical Engineering*, Vol. 53, no 4, 2014.
- [31] S. Shekhar, "Survivable multicasting in wdm optical networks", Tesis doctoral, Universidad de Pune, Maharashtra, India, Agosto de 2004.
- [32] A. Rodríguez, "Redes Ópticas," Tesis Pregrado, Universidad Pontificia ICAI Madrid, España, 2011.
- [33] E. Ibarra y H. A. Enriquez Muñoz, "Análisis del desempeño de la red OBS COST239 mediante Swarm Intelligence aplicando el algoritmo ACO para resolver el problema RWA," Tesis de Pregrado, Universidad del Cauca, Popayan, Colombia, 2015.
- [34] M. Itoiz Etxarri and J. M. Algueta, "*Optical Burst Switching (OBS): Conmutación óptica de ráfagas*," Universidad de Valladolid, Valladolid, España, 2015.
- [35] I. Graña, "Simulación y comparativa de mecanismos de conmutación en redes ópticas," Universidad de Vigo, Vigo, España, 2005.
- [36] Á. Ferreiro, "Tecnologías de Conmutación Óptica: OCS, OBS y OPS", Tesis de Pregrado, Escuela Politécnica Superior, Quito, Ecuador, 2008.
- [37] M. Guillamón, "Diseño de Protocolos sobre Redes Ópticas de Conmutación de Ráfagas", Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, Junio de 2005.
- [38] J. Gil, "Estudio de la integración de los protocolos de GMPLS en redes OBS," Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, España, 2009.
- [39] Cisco, "The Zettabyte Era: Trends and Analysis". [En Línea]. Disponible en: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html>.
- [40] P. Pereira, "Redes Ópticas Elásticas", Tesis Doctoral, Universidad de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2013.



- [41] J. Granada, "Redes ópticas elásticas: un nuevo paradigma en las futuras redes de telecomunicaciones," vol. 20, no. 2, pp. 6-22, 2015.
- [42] M. Jinho, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, "Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 47, no 11, pp. 66-73.
- [43] B. Kim, Y. Cho, J. Lee, Y. Choi, & S. Montgomery, "Performance of optical burst switching techniques in multi-hop networks," *Global Telecommunications Conference*, Vol. 3, 2002.
- [44] J.J. Rodrigues, "Performance Assessment of One-Way Resource Reservation Protocols in IP over Optical Burst Switched Networks," *system communication* 2005, pp. 14-17, 2005.
- [45] V.M. Vokkarane, K. Haridos, & J.P. Jue, "Threshold-based burst assembly policies for QoS support in optical burst-switched networks," *ITCom 2002: The Convergence of Information Technologies and Communications*, pp. 125-136, 2002.
- [46] J. Phuritakul, & J. I. Yusheng, "Resource allocation algorithms for controllable service differentiation in optical burst switching networks. *IEICE transactions on communications*," *IEICE Transactions on communications*, Vol. 88, no 4, pp. 1424-1431, 2005.
- [47] A. Ge, F. Callegati, and L. Tamil, "On optical burst switching and Self-similar traffic," *IEEE Communications Letters*, vol. 4, pp. 98-100, March 2000.
- [48] A. Maach, G. v. Bochmann. "Segmented Burst Switching: Enhancement of Optical Burst Switching to decrease loss rate and support quality of service." 6th IFIP Working Conference on Optical Network design and modeling, Torino, Italy, February 2002.
- [49] A. Hincapié and T. Peña, "Análisis del desempeño de RWA en redes OBS/WDM con control cognitivo basado en algoritmos genéticos", Tesis de Pregrado, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2013.
- [50] M. Klinkowski, *Offset Time-Emulated Architecture for Optical Burst Switching Modelling and Performance Evaluation*, PhD Thesis. Department of Computer Architecture. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Nov. 2007.
- [51] M. Nava, O. Zúñiga, "Análisis del problema de contención en OBS (Optical Burst Switching)", Tesis de pregrado, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2010.
- [52] B. Farrell, Y. Huang, M. Iwen, T. Wang, L. Zhang y J. Zheng, "Wavelength Assignment in Optical Network Design", *Mathematics-in- Industry Case Studies Journal*, Vol 1, pp. 49-65, 2009.



- [53] A. Barradas, “*Quality of service in optical bursts switching networks*”, Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy, facultade de ciencias e tecnologia, Departament de Engenharia Electronica e Informatica, Universidad de Algarve, Faro, Portugal, 2009.
- [54] M. J. O'Mahony, D.Simeonido, & A. Tzanakaki, “The application of optical packet switching in future communication networks. *IEEE Communications magazine*,” *IEEE Communications magazine*, Vol. 39, no 3, pp.128-135, 2001.
- [55] F. Espina, J. Armendariz, M. Izal, D. Morato, E. Magaña, “*Arquitectura y diseño de un modelo de red OBS Para simulación*”, Universidad pública de Navarra, Departamento de Electrónica, Pamplona, España, 2009.
- [56] Ó. Gonzáles, “*Rendimiento de TCP y Cálculo de Rutas en Redes de Conmutación Óptica de Ráfagas*”, Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid, Valladolid, España, 2012.
- [57] S. Lazaro, “*Evaluación de prestaciones de algoritmos RWA para redes todo ópticas WDM en tiempo real*”, Tesis de grado, Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad autónoma de Madrid, España, 2010.
- [58] M. Yoo and C. Qiao, “Just-enough-time (JET): A high speed protocol for bursty traffic in optical networks,” *IEEE/LEOS Technol. Global Information Infrastructure*, pp. 26–27, Aug. 1997.
- [59] J. Y. Wei and R. I. McFarland, “Just-In-Time signaling for WDM optical burst switching networks,” *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, no. 12, pp. 2019–2037, December 2000.
- [60] M. Tena, “*Evaluación de Arquitecturas de Red Híbridas OBS/OCS*”, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2009.
- [61] J. Teng and G. N. Rouskas, “A comparison of the JIT, JET, and horizon wavelength reservation schemes on a single OBS node,” in *Proc. 1st Int. Workshop Optical Burst Switching*, Oct. 2003.
- [62] C. Qiao and M. Yoo, “Optical burst switching (OBS)—a new paradigm for an optical Internet,” *Journal of High Speed Networks*, vol. 8, no. 1, pp. 69–84, 1999.
- [63] R. Inkret, A. Kurchar & Mikac, “*Advanced Infrastructure for Photonic Networks*”, M.C.o.t. P.C. 266 Ed., Zagreb. Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb, 2003.
- [64] J. Capmany, B. Ortega, *Redes Ópticas*, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2006, pp. 149-152.
- [65] R. Bellman, *On a routing problem*, *Quarterly Applied Mathematics*, 16:87–90.





- [66] N. M. Bhide, K. M. Sivalingam, and T. Fabry-Asztalos, "Routing Mechanisms Employing Adaptive Weight Functions for Shortest Path Routing in Optical WDM Networks", *Photonic Network Communications*, July 2001.
- [67] S. Baroni and P. Bayvel, "Wavelength requirements in arbitrarily connected wavelength-routed optical networks," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, pp. 242–251, Feb. 1997.
- [68] F. Guitart, "Algoritmos de Routing en Redes Totalmente Ópticas", *Redes de Banda Ancha*, Barcelona, España. 2009.
- [69] A. Mokhtar and M. Azizoglu, "Adaptive Wavelength Routing in All-Optical Networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 6, no. 2, pp. 197-206, April 1998.
- [70] I. Chlamtac, A. Ganz, G. Karmi, Purely optical network for terabit communication, *Proc. IEEE Infocom '89*, 1989, pp. 887-896.
- [71] J. Turner, "Terabit burst switching," *Journal of High Speed Networks*, vol. 8, no. 1, pp. 3–16, 1999.
- [72] L. Virgili, "*Caracterización de tráfico dinámico en redes ópticas elásticas*", Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2012.
- [73] S. Lima, "*Roteamento Multicritério em Redes Ópticas Elásticas Dinâmicas*", Tesis de maestría, Instituto Federal de Educación, Ciencia y Tecnología de Paraíba, Paraíba, Brasil, 2014.
- [74] R. Fávero, "*Nova Estratégia de Desfragmentação de Canais para Redes Ópticas Elásticas*", Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica de Campinas, Campinas, Brasil, 2015.
- [75] C. Thiessen, "*Resilient routing and spectrum assignment in Elastic Optical Networks under Dynamic Traffic*", Master's Degree Project, School of Information and Communication Technology, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden October 2014.
- [76] A. Cunha de Sousa, "*Políticas de Alocação de Espectro em Roteamento baseado em Balanceamento de Cargas e Fragmentação para Redes Ópticas Elásticas*", Tesis de maestría, Universidad Federal de Pará, Pará, Brasil, 2015.
- [77] S. Shakya, "*Management of Spectral Resources in Elastic Optical Networks*", Dissertation, Georgia State University, 2015.
- [78] K. Guevara y Y. Díaz, "*Impacto de los mecanismos de control de contención en redes OBS distribuidas*", Tesis de pregrado, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2015.



- [79] C. Hernández, y J. Vicente, “*Introducción al simulador de redes NS-2*”, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2011. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12735/Art%C3%ADculo%20docente%20NS-2.pdf?sequence=1>
- [80] M. Morales, M. Calle, J. Tovar y J. Cuéllar, “*Introducción-Simulando con OMNET: selección de la herramienta y su utilización*”, Universidad ICESI, Cali, Colombia, 2013. Disponible en: [http://repository.icesi.edu.co/biblioteca\\_digital/bitstream/10906/68446/1/desdesimulando\\_omnet\\_capitulouno.pdf](http://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/68446/1/desdesimulando_omnet_capitulouno.pdf)
- [81] Departamento de ingeniería telemática, “*OPNET: Manual de usuario*”, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2004– 2005. Disponible en: [http://ansat.es/soporte/docs/fragmentacion/OPNET\\_Modeler\\_Manual.pdf](http://ansat.es/soporte/docs/fragmentacion/OPNET_Modeler_Manual.pdf)
- [82] M. Espinosa, “*Modelado de Mecanismos de Transición a IPv6*”, Tesis Licenciatura, Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Universidad de las Américas Puebla, México, 2007.
- [83] OMNeT++ User manual Version 4.6, OMNeT, 2014. Disponible en: <https://omnetpp.org/doc/omnetpp4/Manual.pdf>
- [84] J. Bravo, J. Prado, “*Análisis del desempeño de una red OBS/WDM distribuida mediante la integración de un método cognitivo basado en meta heurística híbrida para el ensamble de ráfagas*”, Tesis de pregrado, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2015.
- [85] S. Salas, “On the Dijkstra Algorithm”, vol 2, I.d.o.s.e. arXiv, Ed, Cornell, EUU: Cornell University Library / Cornell University, 2008.
- [86] L. Araujo, R. Martínez y M. Rodríguez, “Programación y estructuras de datos avanzadas”, ISBN – 13: 978-84-9961, Madrid, España, 2011.
- [87] R. López, Algoritmo de Dijkstra [En línea], disponible en: <http://ramonlopez.hol.es/Algoritmo%20de%20Dijkstra.pdf>.
- [88] A. Ortuño, “*Diseño y evaluación de prestaciones de una red óptica OBS multinodo mediante herramienta de simulación*”, Tesis de Maestría, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, Colombia, 2009.