

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO ENTRE UNA RED OPS DISTRIBUIDA Y UNA RED OPS SDON



**Daniel Fernando Benavides Quirá
Yeferson Alexander Quinayás Joaquín**

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT)
Popayán, Marzo de 2019**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DESEMPEÑO ENTRE UNA RED OPS
DISTRIBUIDA Y UNA RED OPS SDON**



**Daniel Fernando Benavides Quirá
Yeferson Alexander Quinayás Joaqui**

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

Director: MSc. Virginia Solarte Muñoz

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT)
Popayán, Marzo de 2019**



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	4
1.6 APORTES	5
1.7 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....	5
CAPÍTULO 2: GENERALIDADES DE REDES ÓPTICAS	6
2.1 TÉCNICAS DE MULTIPLEXACIÓN EN REDES ÓPTICAS	6
2.2 COMPONENTES DE UNA RED WDM.....	9
2.3 TÉCNICAS DE CONMUTACIÓN EN REDES ÓPTICAS	10
2.4 SOFTWARE DEFINED NETWORKING (SDN).....	12
2.5 SOFTWARE DEFINED OPTICAL NETWORKING (SDON)	22
CAPÍTULO 3: ENRUTAMIENTO Y ASIGNACIÓN DE ESPECTRO EN REDES OPS	28
3.1 REDES POR CONMUTACIÓN ÓPTICA DE PAQUETES (OPS).....	28
3.2 RSA - ENRUTAMIENTO Y ASIGNACIÓN DE ESPECTRO PARA OPS/EON	32
3.3 RWA - ENRUTAMIENTO Y ASIGNACIÓN DE LONGITUD DE ONDA EN	42
REDES OPS/WDM.....	42
CAPÍTULO 4: MODELOS DE SIMULACIÓN.....	45
4.1 METODOLOGÍA DEL TRABAJO DE GRADO	45
4.2 SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE IMPLEMENTACIÓN Y SIMULACIÓN ...	46
4.3 IMPLEMENTACIÓN Y ADAPTACIÓN DE LOS	49
MÓDULOS DE LAS REDES OPS	49
4.4 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS	55
ALGORITMOS RSA SELECCIONADO	55
CAPÍTULO 5: ESCENARIOS DE SIMULACIÓN Y PRUEBAS.....	60
5.1 INTRODUCCIÓN.....	60
5.2 CASOS DE SIMULACIÓN	60
5.3 CONFIGURACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	61
5.4 SIMULACIÓN DE LAS REDES	63
5.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	64
CAPITULO 6: CONCLUSIONES, RECOMEDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	76
6.1 CONCLUSIONES.....	76
6.2 RECOMENDACIONES.....	77
6.3 TRABAJOS FUTUROS	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Proceso generalizado del trabajo de grado	4
Figura 2.1 Multiplexado y demultiplexado en un sistema WDM	7
Figura 2.2 Rangos de las bandas de operación en redes ópticas	8
Figura 2.3 Componentes de una red WDM (Arquitectura).....	9
Figura 2.4 Funciones del OXC	10
Figura 2.5 Tráfico este-oeste en el centro de datos	13
Figura 2.6 Componentes Principales de una entrada flujo	14



Figura 2.7 Arquitectura básica SDN	18
Figura 2.8 Distribución de la Arquitectura SDN	18
Figura 2.9 Arquitectura 1: Red Conmutada	25
Figura 2.10 Red basada en CDC ROADM	25
Figura 2.11 Red de difusión con receptor sintonizable	26
Figura 2.12 Transmisor sintonizable basado en OBS.....	27
Figura 3.1 Arquitectura de red OPS	29
Figura 3.2 Arquitectura genérica de los nodos de frontera de entrada y salida	30
Figura 3.3 Esquema jerárquico de LSPs en GMPLS.....	31
Figura 3.4 Esquema básico usando GMPLS en redes de OPS basado en el	32
intercambio de etiquetas con redes de OCS	32
Figura 3.5 Arquitectura del nodo central OPS	33
Figura 3.6 Representación lógica de un enlace de fibra óptica en FlexGrid	34
Figura 3.7 Topología de red con 6 nodos y 8 enlaces	35
Figura 3.8 Establecimiento de una conexión óptica elástica.....	36
Figura 3.9 Esquema de asignación de espectro fijo	37
Figura 3.10 Esquema de Asignación de Espectro Semi-Elástico	38
Figura 3.11 Esquema de asignación de espectro elástico con Expansión/Contracción....	38
Figura 3.12 Esquema de asignación de espectro elástico con Reasignación.....	38
Figura 4.1 Metodología del trabajo del grado	45
Figura 4.2 Módulo Fuente/Destino en OMNeT++	49
Figura 4.3 Nodo Frontera de ingreso y egreso	50
Figura 4.4 Submódulos que conforman el Nodo de Frontera	50
Figura 4.5 Conexión entre el Nodo de Frontera y el Nodo Central de una red OPS.....	52
Figura 4.6 Módulos que conforman el Nodo Central	52
Figura 4.7 Módulos Unidad de Control.....	52
Figura 4.8 Topología NSFNeT	53
Figura 4.9 Módulos que conforman el Nodo Centralizado	54
Figura 4.10 Topología NSFNeT con un nodo centralizado	55
Figura 4.11 Diagrama de Flujo Algoritmo de Dijkstra	57
Figura 4.12 Diagrama de Flujo Algoritmo heurístico - LAUC (Adaptado).....	58
Figura 5.1 Probabilidad de Bloqueo vs Tráfico (E) para 8 slots a 1.25 Gbps.....	65
Figura 5.2 Probabilidad de Bloqueo vs Tráfico (E) para 8 slots a 2.5 Gbps.....	65
Figura 5.3 Porcentaje de paquetes Perdidos vs Tráfico (E) para 8 slots a 1.25 Gbps	65
Figura 5.4 Porcentaje de paquetes Perdidos vs Tráfico (E) para 8 slots a 2.5 Gbps	66
Figura 5.5 Probabilidad de Bloqueo para 8 slots a 1.25 y 2.5 Gbps en OPS Distribuida ..	66
Figura 5.6 Probabilidad de Bloqueo para 8 slots a 1.25 y 2.5 Gbps en OPS SDON.....	67
Figura 5.7 Retardo Extremo a Extremo vs Tráfico (E) para 8 slots a 1.25 Gbps.....	67
Figura 5.8 Retardo Extremo a Extremo vs Tráfico (E) para 8 slots a 2.5 Gbps.....	68
a) Dos Redes b) Distribuida c) Centralizada	68
Figura 5.9 Probabilidad de Bloqueo vs Tráfico (E) para 16 slots a 1.25 Gbps	69
Figura 5.10 Probabilidad de Bloqueo vs Tráfico (E) para 16 slots a 2.5 Gbps	70
Figura 5.11 Porcentaje de Paquetes Perdidos vs Tráfico (E) para 16 slots a 1.25 Gbps..	70
Figura 5.12 Porcentaje de Paquetes Perdidos vs Tráfico (E) para 16 slots a 2.5 Gbps....	70
Figura 5.13 Retardo Extremo a Extremo vs Tráfico (E) para 16 slots a 1.25 Gbps.....	71
a) Dos redes b) OPS Distribuida c) OPS SDON.....	71
Figura 5.14 Retardo Extremo a Extremo vs Tráfico (E) para 16 slots a 2.5 Gbps.....	72
a) Dos redes b) OPS Distribuida c) OPS SDON.....	72
Figura 5.15 Paquetes Perdidos, Recibidos y Generados a 1.25 Gbps	73
Figura 5.16 Paquetes Perdidos, Recibidos y Generados a 2.5 Gbps	74



LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Comparación de CWDM Y DWDM.....	7
Tabla 2.2 Comparación entre las técnicas de conmutación óptica	12
Tabla 2.3 Comparación (Teórica) de los controladores SDN.....	22
Tabla 3.1 Presentación de los algoritmos encontrados	42
Tabla 3.2 Comparación de algoritmos de enrutamiento adaptativo	43
Tabla 4.1 Comparación de las herramientas de implementación y simulación	48
Tabla 5.1 Escenario de simulación, Casos y Sub casos de simulación	60
Tabla 5.2 Configuración de la red OPS Distribuida	62
Tabla 5.3 Configuración de la red OPS SDON.....	62
Tabla 5.4 Especificaciones técnicas (Hardware)	63
Tabla 5.5 Resumen del proceso de simulación	64
Tabla 5.6 Resumen de los Resultados de las Simulaciones	74



LISTA DE ACRÓNIMOS

ACK	<i>Acknowledgement</i> , Mensaje de Acuse de Recibo
AFD	<i>Available Fragment Degree</i> , Grado de Fragmentación Disponible
API	<i>Application Programming Interface</i> , Interfaz de Programación de Aplicaciones
ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i> , Modo de Transferencia Asíncrona
AW	<i>Available Wavelengths</i> , Longitudes de Onda Disponibles
BCP	<i>Burst Control Packet</i> , Paquete de Control de Ráfaga
CAPEX	<i>Capital Expenditures</i> , Gastos de Capital
CDC	<i>Colorless Directionless and Contentionless</i> , Sin Dirección y Sin Contención
CF	<i>Center Frequency</i> , Frecuencia Central
CR-LDP	<i>Constraint-based Routing Label Distribution Protocol</i> , Protocolo de Distribución de Etiquetas Basada en Restricciones
CSL	<i>Continuity of Spectrum among Links</i> , Continuidad del Espectro entre Enlaces
CWDM	<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda Dispersa
DC	<i>Data Center</i> , Centros De Datos
DoS	<i>Denial of Service</i> , Denegación de servicios
DW	<i>Distance Weight</i> , Menor Distancia
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa
EBI	<i>EastBound Interfaces</i> , Interfaces Dirección Este
EDFA	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> , Amplificadores de Fibra Dopada con Erbio
ESA	<i>Elastic Spectrum Assignment</i> , Asignación de Espectro Elástico
FEC	<i>Forwarding Equivalent Class</i> , Clase Equivalente de Transmisión
FF	<i>First Fit</i> , Primer Ajuste
FIB	<i>Forwarding Information Base</i> , Base Información de Reenvío
FIFO	<i>First In-First Out</i> , Primero en Entrar Primero en Salir



FSA	<i>Fixed Spectrum Assignment</i> , Asignación de Espectro Fijo
GMPLS	<i>Generalized Multiprotocol Label Switching</i> , Generalización de la Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo
GPON	<i>Gigabit-capable Passive Optical Network</i> , Red Óptica Pasiva con Capacidad de Gigabit
HAW	<i>Hop and Available Wavelengths</i> , Longitudes de Onda Totales y Disponibles
HPLD	<i>Heaviest Path Load Deviation</i> , Desviación de Carga de la Peor Ruta
HTAW	<i>Hop count and Total and Available Wavelengths</i> , Número de Saltos Longitudes de Onda Totales y Disponibles
HW	<i>Hop Weight</i> , Peso por Salto
ILP	<i>Integer Lineal Programming</i> , Programación Lineal Entera
IoT	<i>Internet of Things</i> , Internet de las Cosas
IP	<i>Internet Protocol</i> , Protocolo de Internet
KSP	<i>K Shortest Paths</i> , Caminos K más cortos
LAUC	<i>Latest Available Unused Channel</i> , Último Canal Libre Disponible
LBRWA	<i>Load Balance RWA</i> , Balance de Carga de Enrutamiento y Asignaciones de Longitud de Onda
LCPR	<i>Least Congested Path Routing</i> , Enrutamiento de Menor Congestión
LDP	<i>Label distribution protocol</i> , Protocolo de Distribución de Etiquetas
LL	<i>Least Loaded</i> , Menor Carga
LMP	<i>Link Management Protocol</i> , Protocolo de Gestión de Enlace
LSP	<i>Label Switched Path</i> , Caminos Ópticos
LU	<i>Least Used</i> , Menos Usado
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i> , Red de Área Metropolitana
MFC	<i>Modified Future Cost</i> , Costo Futuro Modificado
MP	<i>Minimum Product</i> , Producto Mínimo
MΣ	<i>Maximum Sum</i> , Máxima Suma
MS	<i>Minimum Sum</i> , Mínima Suma
MSP	<i>Modified Dijkstra's Shortest Path</i> , Camino más corto Dijkstra modificado



MTU	<i>Maximum Transmission Unit</i> , Máxima Unidad de Transmisión
MU	<i>Most Used</i> , Más Usado
NBI	<i>NorthBound Interface</i> , Interfaz Dirección Norte
NBI	<i>NorthBound Interfaces</i> , Interfaces Dirección Norte
NFV	<i>Network Function Virtualization</i> , Virtualización de Funciones de Red
NOS	<i>Network Operating System</i> , Sistema Operativo de Red
NSFNeT	<i>National Science Foundation Network</i> , Red Fundación Nacional de Ciencia
OADM	<i>Optical Add/Drop Multiplexers</i> , Multiplexores de Inserción/Extracción Ópticos
OBS	<i>Optical Burst Switching</i> , Conmutación Óptica de Ráfagas
OCS	<i>Optical Circuit Switching</i> , Conmutación Óptica de Circuitos
OLT	<i>Optical Line Terminal</i> , Terminales de Línea Óptica
ONOS	<i>Open Network Operating System</i> , Sistema Operativo de Red Abierta
OPEX	<i>Operating Expenditures</i> , Gastos de Operación
OPP	<i>Optical Packet Path</i> , Camino de Paquetes Ópticos
OPS	<i>Optical Packet Switching</i> , Conmutación Óptica de Paquetes
OSI	<i>Open System Interconnection</i> , Interconexión de sistemas abiertos
OTS	<i>Open Transport Switch</i> , Conmutador de Transporte Abierto
O-VPN's	<i>Optical-Virtual Private Networks</i> , Redes Privadas Virtuales Ópticas
OXC	<i>Optical Cross-Connect</i> , Conmutadores Ópticos
PVST	<i>Vector Path Searching Tree</i> , Árbol de Búsqueda de Ruta Vectorial
QoS	<i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio
RIB	<i>Routing Information Base</i> , Base de Información de Enrutamiento
ROADM	<i>Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer</i> , Multiplexor Óptico Reconfigurable de Extracción e Inserción
RSA	<i>Routing and Spectrum Allocation</i> , Enrutamiento y Asignación de Espectro
RSVP	<i>Resource Reservation Protocol</i> , Protocolo de Reserva de Recursos



RWA	<i>Routing and Wavelength Assignment</i> , Enrutamiento y Asignación de Longitud de Onda
SBI	<i>SouthBound Interfaces</i> , Interfaces Dirección Sur
SCWP	<i>Scattered Wavelength Path</i> , Algoritmo Ruta de Longitud de Onda Dispersa
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i> , Jerarquía Digital Síncrona
SDM	<i>Space Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Espacio
SDN	<i>Software Defined Networking</i> , Redes Definidas por Software
SDON	<i>Software Defined Optical Network</i> , Redes Ópticas Definidas por Software
SP	<i>Shortest Path</i> , Camino más Corto
SPV	<i>Spectrum-Vector Constraint Path Searching Algorithm</i> , Algoritmo de búsqueda de ruta de restricción de espectro-vector
SSA	<i>Semi-Elastic Spectrum Assignment</i> , Asignación de Espectro Semi-Elástico
SW	<i>Spectral Width</i> , Ancho espectral
TAW	<i>Total and Available Wavelengths</i> , Número de Saltos Disponibles
TCL	<i>Tool Command Language</i> , Lenguaje de Herramientas de Comando
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División en el Tiempo
TP	<i>Threshold Protection</i> , Protección Umbral
VLAN	<i>Virtual Local Area Network</i> , Redes de Área Local Virtual
VNF	<i>Virtual Network Function</i> , Función de Red virtual
VPN	<i>Virtual Private Network</i> , Red Privada Virtual
VTN	<i>Virtual Tenant Network</i> , Redes de Inquilinos Virtuales
WAN	<i>Wide Area network</i> , Redes de Área Extensa
WBI	<i>WestBound Interfaces</i> , Interfaces Dirección Oeste
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda
WR	<i>Wavelength Reservation</i> , Reserva de Longitudes de Onda

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El alto consumo de recursos de red por parte de los usuarios ha dejado en evidencia que las redes tradicionales no satisfacen el aumento en la demanda [1]. Esto se debe en gran parte al surgimiento del Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*) que ha incrementado el número de objetos conectados a la red [2] y al crecimiento exponencial de nuevos usuarios que fuerzan la exploración de nuevas tecnologías para transformar las redes actuales en busca de una gestión de servicios y operaciones mucho más eficaz y con mayor eficiencia que logren mitigar la falta de recursos de la red [3]. Para satisfacer dichos requerimientos, el sector de las telecomunicaciones realiza investigaciones sobre las redes definidas por software y las funciones de red virtualizadas con el fin de lograr redes flexibles según los requerimientos de los usuarios [4].

En la actualidad un gran porcentaje del tráfico de la red es generado por las redes privadas virtuales ópticas (O-VPN's, *Optical-Virtual Private Networks*) y tradicionales, estas garantizan calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*) pero con grandes costos de operación, por lo tanto se plantea el uso de redes definidas por software con virtualización de funciones de red (SDN/NFV, *Software Defined Networking/Network Functions Virtualization*) centralizadas, programables, ágiles y flexibles, que contribuyan a encontrar valores de CAPEX y OPEX favorables para la industria de las telecomunicaciones [5].

En el proceso de lograr la optimización y la sostenibilidad de las redes que se extienden a lo largo del planeta, y en busca de la inclusión de todas o en su defecto la mayoría de infraestructuras existentes con las de nueva generación basadas en SDN, se han propuesto nuevas interfaces: interfaces dirección norte (NBI, *NorthBound Interfaces*), interfaces dirección sur (SBI, *SouthBound Interfaces*), interfaces dirección oeste (WBI, *WestBound Interfaces*), interfaces dirección este (EBI, *EastBound Interfaces*). Estas interfaces garantizan la compatibilidad de las mismas; esto permitirá flexibilidad en las redes, beneficios que se verán reflejados en la eficiencia del uso de los recursos, rapidez y confiabilidad de la red [5][6].

De otro lado, al disponer de los recursos de los centros de datos (DC, *Data Center*) para ejecutar aplicaciones virtuales sensibles al retardo como análisis de video en tiempo real, video bajo demanda o escritorio virtual, el impacto de la latencia de la red de extremo a extremo es muy negativo. La utilización de la red aumenta debido al transporte de altas cantidades de datos relacionadas con el ancho de banda que requieren las aplicaciones en los DC. Por lo tanto, se necesitan recursos informáticos distribuidos en toda la red, cerca al borde para reducir las latencias de los usuarios finales, y optimizar y racionalizar el uso de los recursos de la red [7].

Igualmente, con el fin de mejorar la capacidad de carga y la eficiencia en el uso del espectro óptico se introduce el concepto de enrutamiento y asignación de espectro (RSA, *Routing and Spectrum Allocation*). Se siguen los procesos de enrutamiento y asignación del espectro por separado, con el fin de analizar y operar de forma correcta las redes ópticas elásticas donde el tráfico es altamente dinámico. Todo esto con el fin de obtener una solución y no un problema de tiempo polinomial no determinístico completo (NP- Complete, *Non Deterministic Polynomial Time*) [8].



Además, con el rápido despliegue de las redes y el desarrollo de nuevos servicios mediante SDN/NFV, se proponen nuevos retos en la implementación de las redes como por ejemplo el mejoramiento en su desempeño mediante la medición de sus parámetros [9]. Si se define en principio que el comportamiento de la capa física es ideal al emplear redes ópticas definidas por software (SDON, *Software Defined Optical Network*), se buscan soluciones viables y factibles en la orquestación¹ de servicios en un entorno real, donde es de vital importancia tener en cuenta: la probabilidad de bloqueo y los retardos presentados cuando se utiliza Conmutación Óptica de Paquetes (OPS, *Optical Packet Switching*) [5].

Debido a la gran limitación del procesamiento de los equipos de telecomunicaciones años atrás, se optaba por el uso de las redes distribuidas para evitar la saturación en los nodos. Sin embargo en la actualidad los equipos de telecomunicaciones tienen un gran potencial para la exploración, definición e implementación de redes centralizadas.

En síntesis, en el presente trabajo de grado se propone inicialmente poner en funcionamiento una red OPS distribuida mediante simulación, basada en la topología NSFNet² la cual opera bajo RSA y posteriormente migrarla a una red OPS centralizada mediante SDON manteniendo las características RSA y también sobre NSFNet para analizar y comparar el desempeño de las mismas. Por lo tanto se formula la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué impacto tiene el desempeño de una red SDON respecto a una red OPS distribuida convencional?

1.2 ESCENARIO DE MOTIVACIÓN

En la actualidad (2019), las redes ópticas son esenciales en los sistemas de telecomunicaciones; estas se encargan de suplir grandes cantidades de ancho de banda requeridas por los usuarios. Sin embargo con el aumento exponencial de la demanda de recursos, las redes deben ser optimizadas para ofrecer mejor desempeño. Es así, como se centra la atención en el tipo de topología de red que comúnmente se utiliza, es decir la distribuida. En busca de mejorar el servicio surge la idea de explorar la topología centralizada al virtualizar las funciones de red y observar el comportamiento en los parámetros de desempeño.

Para analizar si existen cambios favorables con respecto al retardo, la probabilidad de bloqueo y otros aspectos que surjan durante el desarrollo del presente trabajo, se plantea la comparación entre las dos topologías (distribuida y centralizada) de tal manera que los resultados que se obtengan sean lo más confiables posibles, teniendo en cuenta las limitaciones que se presenten.

Hallar un algoritmo determinístico para un problema de tiempo polinomial no determinístico completo (NP-Complete) como el ensamblamiento de paquetes en las redes OPS distribuida y SDON es difícil. Por lo tanto se exploran técnicas heurísticas que generen una buena solución y traten de mejorarla con respecto a la migración.

¹ La Orquestación acopla la capa superior de los servicios con las operaciones de red de una manera abstracta. Para ambientes SDON la orquestación se analiza como respaldo de redes multicapas.

² Se adopta NSFNET puesto que es una topología de red utilizada ampliamente para simular y analizar redes.

En síntesis, en el presente trabajo de grado se analizará comparativamente el desempeño de una red OPS distribuida y una red OPS SDON a nivel de red (OSI), con parámetros de desempeño como probabilidad de bloqueo, retardo u otros que afecten el desempeño, usando la tecnología de conmutación óptica de paquetes (OPS), aplicados en una red óptica con topología NSFNet.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Analizar el desempeño³ de una red OPS distribuida y una red OPS SDON.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a nivel de simulación, una red óptica de transporte distribuida basada en OPS (Optical Packet Switching) sobre RSA.
- Adaptar los módulos de la red OPS distribuida a una red OPS SDON (Software Defined Optical Networks).
- Implementar una red OPS SDON mediante simulación.
- Analizar comparativamente el desempeño de las dos infraestructuras anteriores.

1.4 ENFOQUE

Para el desarrollo del presente trabajo de grado, se realizó un estudio bibliográfico sobre las temáticas a tratar (redes OPS y OPS SDON, sus características, arquitectura funcional y diferencias), recolectando y analizando información en trabajos de investigación que siguen la misma línea de desarrollo y exploración. Por lo tanto, se realizó una investigación minuciosa en la literatura sobre las dos topologías presentadas en este trabajo de grado: red OPS distribuida y red OPS SDON, donde se encontraron las diferentes heurísticas para afrontar los dos retos propuestos.

Para el desarrollo de este proyecto se caracterizan los modelos de red OPS y OPS SDON basados en la Topología de red NSFNet. Esta es una red WAN (*Wide Área Network*) que conecta 14 ciudades de los Estados Unidos de América con una topología irregular. Dicha red ha sido utilizada en numerosos estudios e investigaciones [10].

Posteriormente, y teniendo en cuenta el estudio bibliográfico realizado, se seleccionan las heurísticas más adecuadas para los retos de las redes OPS y OPS SDON. Se definen las características para la generación de los modelos de simulación implementados en la herramienta de simulación IDE OMNeT.

Finalmente, se realizó la evaluación del desempeño de las redes, probando la implementación de algoritmos RSA seleccionados, con los parámetros de desempeño: probabilidad de bloqueo y retardo extremo a extremo con las dos topologías mencionadas previamente. En la Figura 1.1 se puede visualizar de manera general, el proceso que se realizó para cumplir con el objetivo general del presente trabajo de grado.

³ En términos de probabilidad de bloqueo, retardo u otros que afecten el desempeño.

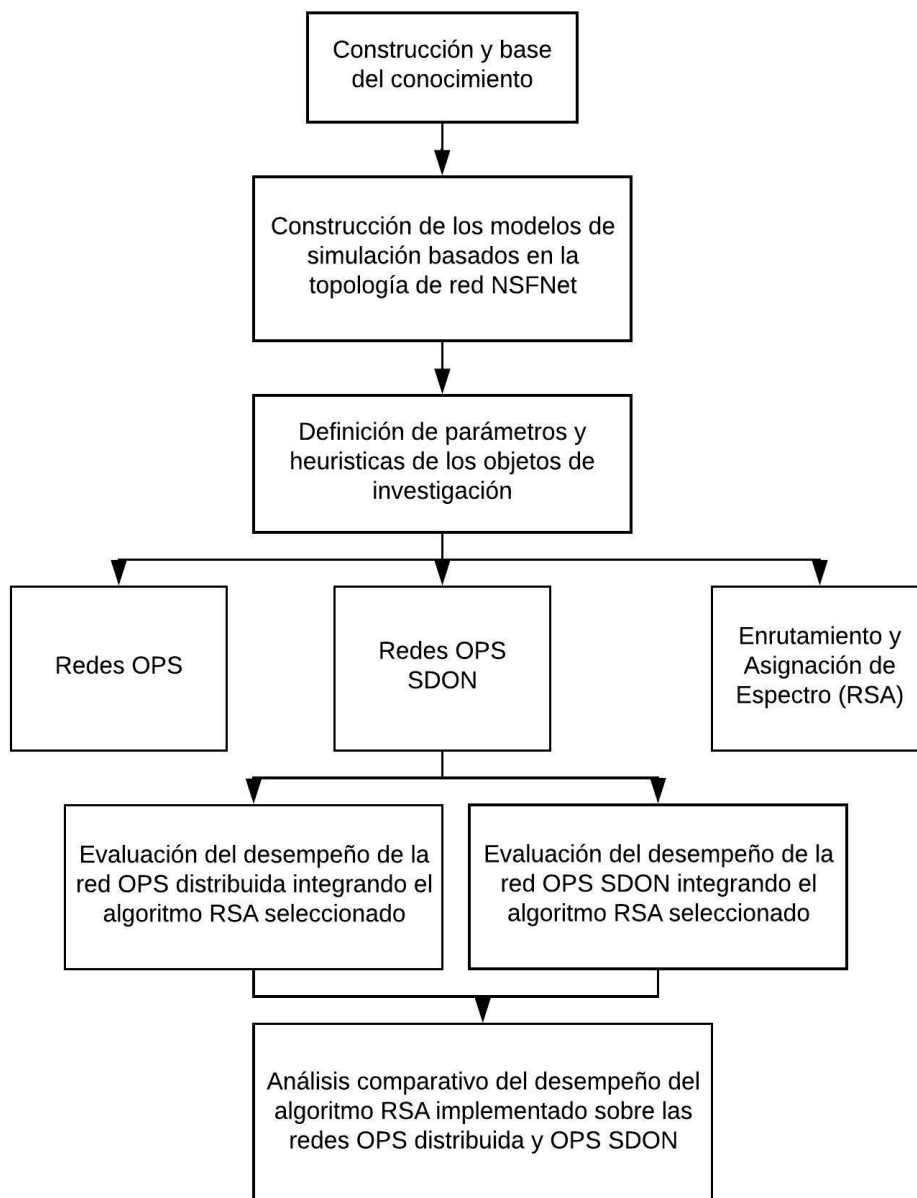


Figura 1.1 Proceso generalizado del trabajo de grado.

1.5 ALCANCE

Este documento detalla el proceso de diseño y obtención de los modelos de simulación de las redes OPS distribuida y OPS SDON sobre la topología NSFNet, la cual es una red de área amplia (WAN, *Wide Area Network*) sobre los Estados Unidos Americanos. La red consta de 14 nodos, 21 conexiones bidireccionales, con enlaces entre los 300 y 2800 km.

Para analizar el desempeño de las dos topologías de red definidas en los objetivos del presente trabajo de grado con base en la red NSFNet, se tuvieron dos escenarios de estudio. El primero de estos, es la red OPS distribuida y la segunda la red OPS SDON; para ambos casos se utiliza tecnología FlexGrid, se implementan algoritmos RSA y se utilizan velocidades de los enlaces de 1.25 y 2.5 Gbps para diferentes valores de tráfico, y así observar el comportamiento de las redes ópticas cuando se varía la topología y finalmente comparar los resultados con respecto a los parámetros de desempeño.

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 de este trabajo de grado son:

- Análisis detallado sobre el estudio y aplicación de heurísticas a procesos de asignación de recursos de red en redes OPS distribuidas y OPS SDON.
- Caracterización de una red óptica de transporte distribuida basada en OPS.
- Diseño e implementación de algoritmo para enrutamiento y asignación de espectro.
- Propuesta de una red óptica centralizada basada en OPS mediante la aplicación de conceptos de OPS SDON.
- Análisis comparativo mediante la simulación de las redes ópticas de transporte caracterizadas previamente (OPS y OPS SDON) al estudiar los parámetros de desempeño: probabilidad de bloqueo y retardo extremo a extremo.

1.7 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

En el Capítulo 2, se abordan los conceptos básicos y temáticos relacionados con la tecnología FlexGrid en redes ópticas. De la misma manera, se definen las generalidades de las redes ópticas y técnicas de conmutación óptica (enrutamiento y asignación de espectro en redes OPS). De esta manera se brinda una base del conocimiento para el presente trabajo de grado.

En el Capítulo 3, se hace énfasis en la técnica de conmutación óptica de paquetes (OPS), sus características, arquitectura y funcionamiento. Además, se incluyen conceptos sobre las redes OPS distribuidas y las redes OPS SDON. También los tipos de algoritmos RSA, heurísticas y meta heurísticas encontradas en la consulta literaria realizada.

En el Capítulo 4, se describe el proceso de implementación y caracterización en la herramienta IDE OMNeT++ de las redes NSFNet OPS distribuida y OPS SDON, 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 el algoritmo RSA. Las respectivas pruebas se realizaron en el 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

Una red de transporte de nueva generación puede contener varios planos de red. En la mayoría de los casos se pueden visualizar tres de ellos, los cuales son: capa de control, capa de datos y capa de gestión. La capa de control se enfoca principalmente en cómo se deben enviar los paquetes por los dispositivos de la red llevando las decisiones a cada uno de ellos. Generalmente se ajustan las tablas de enrutamiento de acuerdo a la topología de red o a las solicitudes de servicio externo. Posteriormente se tiene la capa de gestión que se encarga de supervisar, configurar y mantener los dispositivos de la red. Y finalmente se tiene la capa de datos donde residen las aplicaciones y los servicios que definen el comportamiento de la red, encargadas de la transmisión de la información y que está conformada por enlaces y dispositivos de nivel físico [11]. De esta manera se busca realizar un análisis de la red distribuida donde se realice la abstracción de la capa de datos y la capa de control para posteriormente obtener una topología de red centralizada.

2.1 TÉCNICAS DE MULTIPLEXACIÓN EN REDES ÓPTICAS

En las redes ópticas hay tres técnicas de multiplexación: 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, *Wavelength Division Multiplexing*). En la sección 2.1.3 se hace una mayor descripción de la técnica WDM, la cual es utilizada en este trabajo de grado.

2.1.1 Multiplexación por División de Tiempo (TDM)

Se aplica cuando la capacidad de la tasa de datos de transmisión es mayor que la tasa de datos requerida por los dispositivos transmisores y receptores, es decir cuando la velocidad de transmisión por el medio excede la velocidad de las señales digitales a transmitir. Es posible transmitir señales digitales a través de una única ruta mediante la mezcla temporal de partes de cada una de las señales. Para TDM, múltiples transmisores pueden ocupar un único enlace subdividiendo y entrelazando sus posiciones. El enlace se hace seleccionando el tiempo en lugar de la frecuencia. Las muestras tomadas de cada canal se organizan, configurando la trama que se transmitirá por el medio de transmisión único [12].

2.1.2 Multiplexación por División de Espacio (SDM)

En la técnica SDM se transmite información paralelamente. Los canales de comunicación se separan físicamente empleando varios cables agrupados en forma paralela y por estos se propagan señales de distintas fuentes que están contenidos en el mismo medio de transmisión [13].

2.1.3 Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM)

Es una técnica en la cual se transmiten señales de información que ocupan la misma banda de frecuencias a través de la misma fibra y al mismo tiempo se trata de que no hagan interferencias entre sí. Esto se logra modulando diodos de láser que transmiten ondas luminosas a distintas longitudes de onda y a distintas frecuencias. En esta multiplexación se acopla la luz de dos o más longitudes de onda discreta para que entren y salgan de una fibra óptica.

Cada longitud de onda es capaz de llevar grandes cantidades de información, sea analógica o digital, y la información puede estar multiplexada por división de tiempo [13]. A continuación, la Figura 2.1 muestra el multiplexado y demultiplexado de 6 láseres para un sistema WDM; primero el multiplexor recibe cada una de las señales ópticas provenientes de las fuentes ópticas de láser, las transmite sobre un mismo cable de fibra y así el espectro del canal óptico resultante contendrá las longitudes de onda. Luego el demultiplexor separa cada señal de acuerdo a su longitud de onda [13][14].

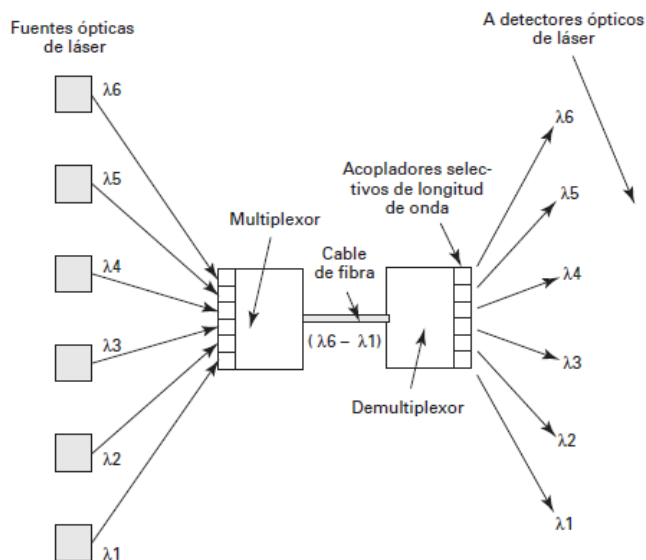


Figura 2.1 Multiplexado y demultiplexado en un sistema WDM. Tomada de [13].

Los sistemas WDM implementados en distancias cortas utilizan multiplexación por división de longitud de onda dispersa (CWDM, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*) y los implementados en distancias cortas y largas utilizan multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*) [15][16]. A continuación se presenta la Figura 2.2 donde se observan los rangos de las bandas de operación utilizadas en las redes ópticas y la tabla 2.1, donde se comparan CWDM y DWDM.

Tabla 2.1 Comparación de CWDM Y DWDM. Adaptada de [17].

CARACTERÍSTICAS	CWDM	DWDM MAN ⁴ /WAN	DWDM LARGO ALCANCE
Espaciamiento de los canales	20nm	0.8 nm	0.4 nm
Bandas de operación	O, E, S, C, L	C, L	C, L, S
Canales por fibra	4 - 16	32 - 80	80 - 160
Capacidad por canal	2.5 Gb/s	10 Gb/s	10 – 40 Gb/s
Distancias típicas	Menor o igual a 80 Km	81 Km - 999 Km	Mayor o igual a 1000 Km
Costos	Bajo	Medio	Alto

⁴ Red de área metropolitana (MAN, *Metropolitan Area Network*): es una red de alta velocidad con cobertura en un área geográfica extensa (desde un área regional a un área metropolitana), y proporciona integración de múltiples servicios mediante la transmisión de datos, voz y vídeo.

En la Tabla 2.1, se observa que las diferencias entre CWDM y DWDM están principalmente en los espaciamentos de los canales, la capacidad por canal, las distancias típicas y los costos.

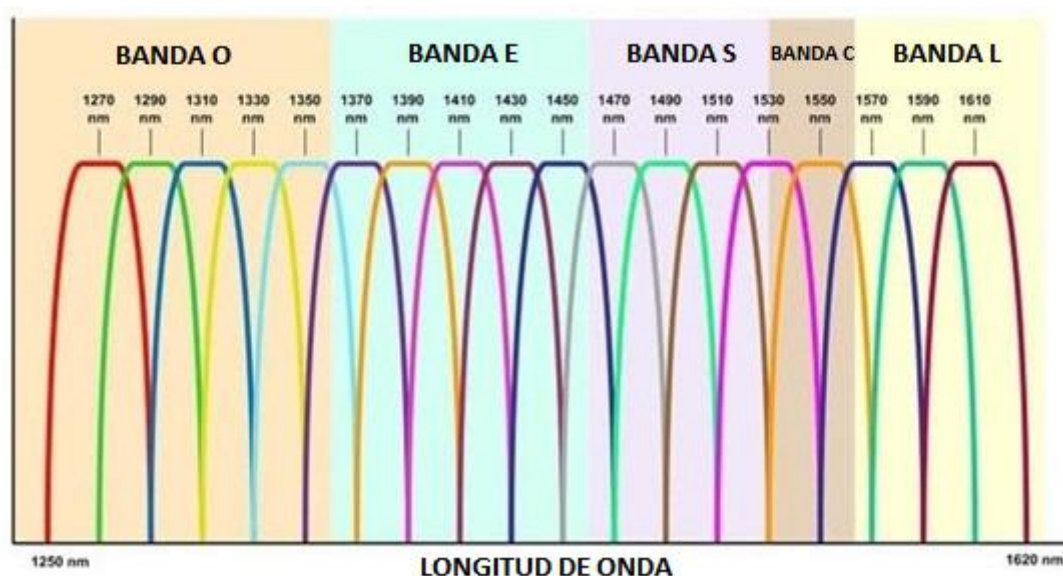


Figura 2.2 Rangos de las bandas de operación en redes ópticas. Tomada de [17].

2.1.3.1 Multiplexación por Division de Longitud de Onda Densa (DWDM)

DWDM permite aumentar la capacidad de transporte de las redes existentes. Esto se hace por medio de multiplexores ya que DWDM combina un gran número de portadoras ópticas sobre una misma fibra permitiendo así su amplificación y transmisión en simultáneo en distintas longitudes de onda ya que se utiliza el espaciamento mínimo entre canales ópticos de la tabla 2.1 (25 GHz, 50 GHz, 100 GHz). Así, DWDM puede multiplexar varias señales TDM sobre la misma fibra y puede transportar desde 40 hasta 160 canales ópticos. Esta técnica opera en la banda C extendida, donde se encuentran la banda C, parte de la banda S y la banda L. La banda C extendida se encuentra en el rango de 1500 a 1600 nm y es la mejor banda para implementar DWDM debido a que la dispersión y las pérdidas de inserción son bajas y se presenta una menor atenuación en esta banda. Este rango de la banda C extendida permite el uso de amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifier*), que son de gran ayuda para redes con gran cantidad de tráfico que manejan largas distancias [15][17][18].

2.1.3.2 Multiplexación por División de Longitud de Onda Dispersa (CWDM)

CWDM se caracteriza por tener un espaciamento entre canales relativamente grande (20 nm), lo que hace que los dispositivos para implementar CWDM no sean tan precisos y por lo tanto sean más asequibles que los empleados en tecnología DWDM. Esta técnica opera en el rango de 1270 a 1610 nm y utiliza láseres con mayor ancho espectral y sin estabilización en frecuencia. CWDM es una tecnología más sencilla que se adapta a los requerimientos que presentan algunas redes empresariales y metropolitanas de corta distancia (distancias no superiores a 80 Km) que no necesitan tasas de transmisión tan altas como las que ofrece la tecnología DWDM [16][17].

2.2 COMPONENTES DE UNA RED WDM

En la Figura 2.3 se observan los componentes de una red WDM que posteriormente se describen desde la sección 2.2.1 hasta la sección 2.2.4.

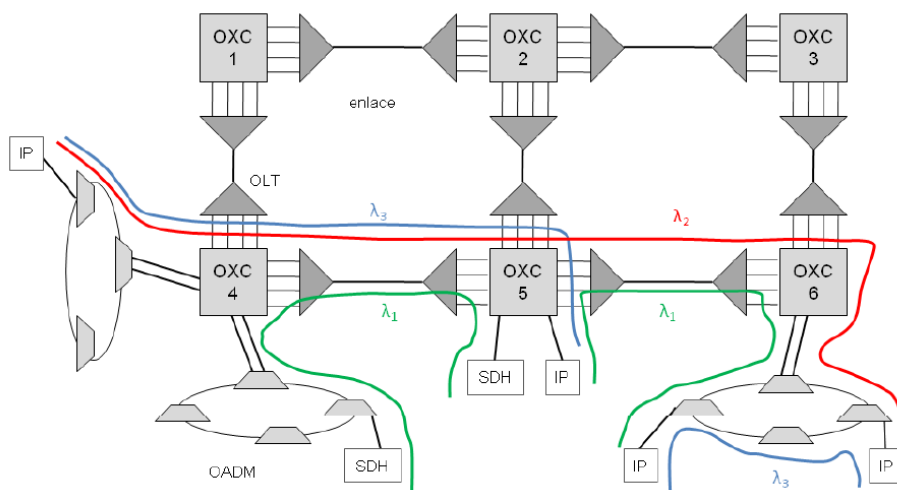


Figura 2.3 Componentes de una red WDM (Arquitectura). Tomada de [19].

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

Los OLT finalizan una conexión punto a punto con el fin de multiplexar o demultiplexar las longitudes de onda de los caminos ópticos. Estos terminales adaptan señales de la capa cliente en la capa óptica y viceversa. Cabe aclarar que la capa cliente está conformada por las redes externas de la Figura 2.3: el protocolo de internet (IP⁵, *Internet Protocol*) y la jerarquía digital síncrona (SDH⁶, *Synchronous Digital Hierarchy*) [19].

2.2.2 Amplificadores ópticos

Con el fin de aumentar la intensidad de la señal y la correcta recepción en el destino se hace uso de amplificadores ópticos de fibra estándar, los cuales tienen fibra dopada con erbio que al hacer conversión al dominio eléctrico permite la amplificación de la señal [20].

2.2.3 Multiplexores de Inserción/extracción ópticos

Los Multiplexores de Inserción/extracción ópticos (OADM, *Optical Add/Drop Multiplexers*) reducen los costos de operación de la red al seleccionar y extraer longitudes de onda de una señal WDM desde el puerto de entrada hasta los puertos locales y dejan pasar el resto de la señal WDM al puerto de salida sin modificarla. Los OADM seleccionan e insertan longitudes de onda desde los puertos locales hasta el puerto de salida. Estos multiplexores se utilizan mayormente en redes MAN con topología de anillo WDM [19].

⁵ IP: Su función principal es el uso bidireccional en origen o destino de comunicación para transmitir datos.

⁶ SDH: es un conjunto de protocolos de transmisión de datos donde se utiliza fibra óptica en sistemas flexibles con anchos de banda elevados.

2.2.4 Conmutadores Ópticos

Los conmutadores ópticos (OXC, *Optical Cross-Connect*) llevan los datos desde una longitud de onda de un puerto de entrada hasta una longitud de onda en un puerto de salida. Estos también encaminan la ráfaga hasta un nodo de destino o nodo de egreso donde las ráfagas se desensamblan y los paquetes son entregados a los clientes finales [21]. Las funciones del OXC son:

- . Conmutación de Fibras: también conocida como una conmutación tipo espacial en la cual se encaminan todas las longitudes de onda de una fibra de entrada a una de salida [21].
- . Conmutación de longitud de onda: en esta técnica se conmutan longitudes de onda comenzando en una fibra de entrada hasta varias fibras de salida, ya sean de multiplexación o demultiplexación [21].
- . Conversión de longitud de onda: en esta técnica una longitud de onda del puerto de entrada se convierte en otra longitud de onda en el puerto de salida [21].

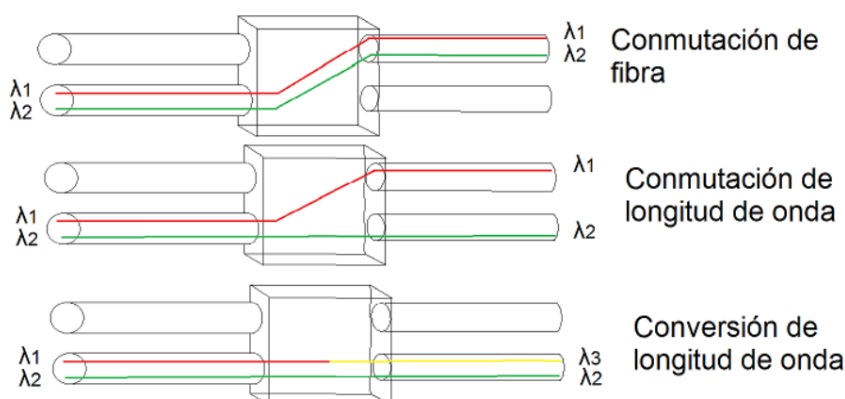


Figura 2.4 Funciones del OXC. Tomada de [17].

Las funciones del OXC descritas brevemente en la sección 2.2.4 se pueden ver en la Figura 2.4. El ejemplo de la conmutación de fibra y de longitud de onda, al igual que la conversión de longitud de onda de la Figura 2.4 se hace para dos longitudes de onda diferenciadas por los dos colores.

2.3 TÉCNICAS DE CONMUTACIÓN EN REDES ÓPTICAS

La técnica de la conmutación se encarga del establecimiento de una conexión entre un nodo origen y un nodo destino en una red óptica sin importar la distancia requerida para la transferencia de información. Con el fin de aprovechar el gran rendimiento de la fibra óptica se hace uso de tecnologías ópticas de conmutación como conmutación óptica de circuitos (OCS, *Optical Circuit Switching*), conmutación óptica de ráfagas (OBS, *Optical Burst Switching*) y OPS [22]. A continuación se describen estas tres técnicas de conmutación ampliando un poco más la información sobre OPS, técnica utilizada en este trabajo de grado.

2.3.1 Conmutación Óptica de Circuitos (OCS)

Esta técnica de conmutación realiza solo un proceso previo de establecimiento de recursos de red y no por cada nodo intermedio del camino óptico, evitando interrupciones en la transmisión origen-destino [23]. Para el establecimiento del camino óptico (*lighpath*) en OCS, el nodo origen envía un paquete de control que solicita la reserva de recursos, esperando la confirmación de la asignación de dichos recursos para iniciar correctamente la transmisión de los datos. OCS es una técnica orientada a la conexión la cual relaciona una longitud de onda con cada conexión entre el nodo origen y el nodo destino. Una vez establecida la conexión entre origen y destino, se lleva a cabo la transmisión, la cual resulta libre de retardos, almacenamiento y reenvío de paquetes IP [24].

2.3.2 Conmutación Óptica de Ráfagas (OBS)

Esta técnica nace debido al tamaño reducido de los paquetes en OCS y a los problemas en la implementación de OPS. OBS conmuta paquetes más grandes que OPS y es de gran ayuda en redes con demandas densas de tráfico [25][24]. El funcionamiento de OBS se basa en encapsular varios paquetes dentro de un macro-paquete y enviarlo hasta el nodo destino; así el conmutador analiza solo una cabecera y se reduce el retardo de los paquetes y en general el retardo del macro-paquete [26][27]. Entonces por cada ráfaga de paquetes, OBS propone un paquete de control de ráfaga (BCP, *Burst Control Packet*) que se envía con anterioridad para que las ráfagas no tengan que esperar en cada nodo la configuración respectiva y así tener un nodo configurado antes de que la ráfaga llegue a este y gracias a esto las ráfagas se envían al nodo destino sin retardo excepto por el tiempo inicial en el que se espera la configuración de los nodos y por el tiempo de transmisión de la ráfaga [28][29].

2.3.3 Conmutación Óptica de Paquetes (OPS)

Esta técnica de conmutación se basa 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. OPS emplea pequeños bloques o unidades de datos denominados paquetes, cada uno tiene un formato compuesto por un encabezamiento y una carga útil que corresponde a los datos de usuario. Cuando un nodo de la red recibe un paquete por uno de los puertos de entrada, analiza solo la información del encabezamiento y de acuerdo con esta mientras la carga útil es conmutada en el dominio óptico, envía el paquete hacia un puerto de salida adecuado. Igualmente, de ser necesario el contenido del encabezamiento puede ser modificado. Cabe aclarar que el encaminamiento se realiza en el dominio óptico [21][30][31]. Los procesos de transmisión, enrutamiento y procesamiento son aplicados en cada uno de los paquetes en los cuales se divide la señal óptica enviada [32]. El uso de OPS ayuda a usar eficientemente el ancho de banda, a tener una mayor flexibilidad y un gran dinamismo en la red [33]. Para la implementación de OPS, hay tres problemas originados por la falta de tecnológica para el almacenamiento y procesamiento de señales de luz [32], estos son:

- Es necesario pasar la cabecera al dominio eléctrico y electrónicamente decidir el encaminamiento, debido a que los conmutadores aún no pueden procesar ópticamente [34].

- No se cuenta con tecnología de almacenamiento óptico que logre almacenar un paquete que espera ser conmutado cuando se está procesando su cabecera o cuando otro paquete utiliza la misma interfaz de salida [34][35].
- La complejidad en la implementación de OPS al buscar una estricta sincronización entre el paquete y la cabecera [22][34].

Tabla 2.2 Comparación entre las técnicas de conmutación óptica [17][36].

TÉCNICA DE CONMUTACIÓN	UTILIZACIÓN DEL ANCHO DE BANDA	LATENCIA	BUFFER ÓPTICO	SINCRONIZACIÓN (PAQUETE – CABECERA)	TOLERANCIA A LAS FALLAS	DIFICULTAD EN LA IMPLEMENTACIÓN
OCS	Baja	Alta	No es necesario	Baja	Baja	Baja
OPS	Alta	Baja	Se necesita	Alta	Alta	Alta
OBS	Media	Baja	No es necesario	Baja	Media	Media

Se profundiza en OPS en el Capítulo 3 ya que en los objetivos del trabajo de grado se especifica el manejo de esta técnica para la red centralizada (SDON). Cabe resaltar que se estudiará cada elemento de la red OPS dirigido hacia la búsqueda de ruta y asignación de espectro (dinámico y estático).

2.4 SOFTWARE DEFINED NETWORKING (SDN)

En SDN se tiene un controlador encargado del plano de control, que se logra separando el plano de control del plano de datos. Se lleva a cabo un control centralizado de la red, que se gestiona por medio del administrador encargado del tráfico de la red. El tráfico de la red se maneja por medio de una aplicación de consola, lo que hace más flexible a la red. El administrador crea un flujo dinámico que responde al tráfico de la red, es decir que puede bloquear un tipo específico de paquete y también introducir un tiempo en el que puede circular el paquete por un flujo. El procesamiento de los paquetes pasa a ser dinámico con respecto a las redes tradicionales, debido a la interfaz de programación característica de SDN de la cual depende el reenvío de los paquetes. Entonces se trata cada paquete por separado por medio del nodo principal pero este a su vez evalúa a cada paquete bajo unas normas ya establecidas [37]. Para cumplir con los requisitos de rendimiento, escalabilidad y agilidad que exige la red es necesaria la implementación de SDN/NFV. A continuación se muestra el tráfico este-oeste⁷ en el centro de datos, cambio necesario debido a que las redes tradicionales son arquitecturas jerárquicas orientadas a tráfico norte-sur⁸.

SDN mejora considerablemente algunas limitaciones de las redes tradicionales como:

- La compleja configuración individual de los dispositivos de la red debido a que son redes difíciles de gestionar.

⁷ Tráfico este-oeste: es decir, tráfico entre servidores en paralelo, no jerárquico.

⁸ Tráfico norte-sur: es decir, tráfico cliente- servidor, en vertical.

- La mala adaptación al cambio debido a que las redes son muy estáticas.
- La mala flexibilidad debido a que las nuevas redes exigen experimentar con nuevas aplicaciones bajo un control centralizado [38].

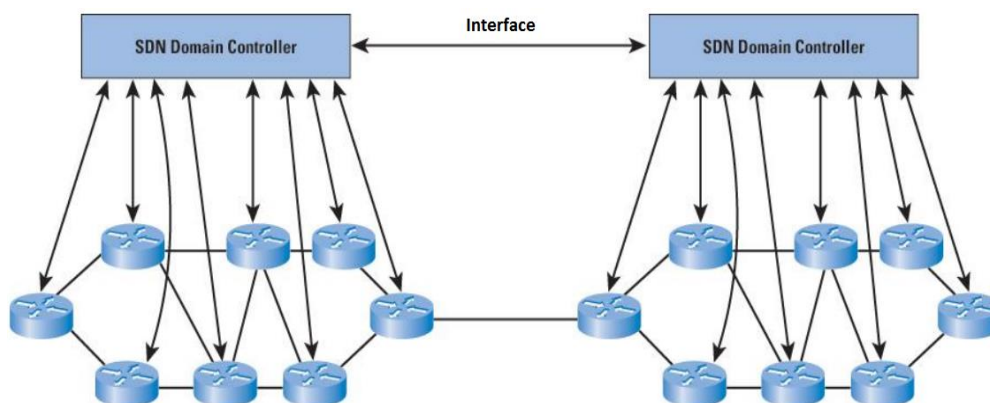


Figura 2.5 Tráfico este-oeste en el centro de datos. Adaptada de [38].

En la Figura 2.5 se muestra el tráfico este-oeste en el centro de datos, en la cual se tiene una interfaz que hace posible la comunicación entre dos controladores SDN.

2.4.1 Separación del plano de datos y plano de control

En SDN se establece como el ítem más importante ya que complementa los conceptos existentes de esta separación. Esta separación puede proporcionar un control centralizado total, un control centralizado con dispositivos de red de control distribuido parcial (distribución híbrida), o un control totalmente distribuido [38]. El plano de control crea la tabla de reenvío a partir de un conjunto de datos locales llamado base de información de enrutamiento (RIB, *Routing Information Base*) y luego dirige las entradas y salidas del dispositivo. La RIB se actualiza constantemente y cuando sea estable se crea la información de reenvío base (FIB, *Forwarding Information Base*). Es decir que la RIB no se utiliza en el reenvío pero si en el plano de control, mientras que la FIB si se utiliza en el reenvío de paquetes [39].

En el plano de datos los datagramas entrantes se gestionan por medio de confirmaciones a nivel de enlace que verifican que dato sea el adecuado. Cuando se tiene un datagrama erróneo al comparar con la tabla FIB, el datagrama es llevado al controlador para decidir lo que se hace con el paquete. En servicios de gran ancho de banda se hace búsqueda en las tablas (RIB, FIB) con el fin de tener un gran rendimiento en el reenvío de los paquetes. Es necesario elegir si se implementa una red con sistema software o hardware, o una combinación de los dos. Estos tipos de reenvío definen el funcionamiento de la red a pesar de sus diferencias⁹ [38]. En este plano se exige un número de identificaciones o cabeceras, con las cuales se disminuye el tiempo de búsqueda de reenvío, al identificar el destino del paquete [39].

⁹ Diferencias como las características del destino y el rendimiento, que dan lugar a tener diferentes parámetros como la velocidad de operación, memoria o diferente eficiencia en el manejo de paquetes de tamaños diferentes.

2.4.2 Características de SDN

Las características de SDN, que son de gran importancia ya que en este tipo de redes se propone la centralización del control de la red por medio de un controlador, además se hace uso del protocolo *Openflow* (descrito en la sección 2.4.3) con el fin de ajustar los dispositivos al modelo de SDN [40], son:

- Fácil despliegue: desde cualquier parte de la red gracias a los sistemas conectados al controlador [38].
- Arquitectura directamente programable: la congestión en una ruta disminuye con la ayuda del control de la red, ya que es altamente programable y permite la configuración de las rutas de circulación de datos.
- Agilidad de la arquitectura: el constante monitoreo de la red permite que se hagan modificaciones dinámicamente por parte del administrador [41].
- La gestión centralizada por medio de un controlador SDN a través del cual se dirige y separa el tráfico de la red.
- Arquitectura de Programación configurada: la asignación dinámica de recursos para el control del tráfico de la red a través de programas SDN.
- Reducción de la configuración manual: se da paso a la configuración automática de la red, donde SDN disminuyen los gastos operativos, el número de errores y el tiempo de inactividad de la red [41].

2.4.3 Protocolo OpenFlow

Es la primera interfaz estándar de comunicaciones definida entre el control y la capa de infraestructura en una arquitectura SDN, con la cual es posible el acceso a manipular el plano de reenvío de datos por medio de los dispositivos de red (físicos o virtuales). Este protocolo es necesario para pasar el control de la red de los dispositivos hasta el software de centralización. *OpenFlow* se implementa en los dos extremos de la interfaz que comunica a la infraestructura de red con el *software* de control SDN. Una arquitectura SDN basada en *OpenFlow* permite que la red responda a cambios en tiempo real [40][41].

2.4.3.1 Proceso *OpenFlow Pipeline*

Con *OpenFlow* se manejan 2 tipos de conmutadores:

- Los conmutadores *OpenFlow*, aquellos que solo soportan operaciones *OpenFlow*.
- Los conmutadores híbridos, que pueden seleccionar una o más redes de área local virtual (VLAN, *Virtual Local Area Network*) [41].

Cada conmutador lleva a cabo un proceso compuesto de tablas de flujo que contienen entradas de flujo como se muestra en la Figura 2.6.

Match Fields	Priority	Counters	Instructions	Timeouts	Cookie	Flags
--------------	----------	----------	--------------	----------	--------	-------

Figura 2.6 Componentes Principales de una entrada flujo. Tomada de [42].

En la Figura 2.6 se observan los principales componentes de una entrada de flujo en una tabla de flujo, presentados a continuación:

- Campos de coincidencia (*Match Fields*): donde se establecen unas reglas o prerequisites para que a los paquetes se les aplique un procedimiento o serie de instrucciones [42].
- Prioridad (*Priority*): donde se establece un valor con el que se evalúa la entrada de flujo.
- Contadores (*Counters*): se actualizan con cada procesamiento de un paquete [42].
- Instrucciones (*Instructions*): aquellas que sirven para modificar el conjunto de acciones
- Tiempos de espera (*Timeouts*): corresponde al tiempo máximo de duración de una entrada de flujo debido a que este se crea con un tiempo determinado o no se utiliza en un tiempo determinado [42].
- Información relacionada (*Cookie*): donde se filtran las estadísticas o cambios en un flujo por medio de la selección de un valor. Dicha selección es realizada por el controlador [42].
- Banderas (*Flags*): Las banderas se encargan de alterar la forma en que son administradas las entradas de flujo [42].

En resumen, el proceso *OpenFlow Pipeline* determina la interacción de los paquetes con las tablas de flujo. Durante este proceso se evalúan las tablas de flujo (enumeradas secuencialmente iniciando desde 0) empezando en la tabla de flujo 0. El paquete entra en la tabla de flujo y el conmutador se encarga de buscar coincidencias entre los campos de coincidencia (*Match Fields*). Cuando el conmutador no encuentra coincidencias, el paquete pasa a la próxima tabla de flujo y el conmutador repite el mismo proceso de búsqueda hasta la última tabla de flujo para enviar el paquete al controlador y que este retorne una acción. Si el conmutador encuentra coincidencias, evalúa la entrada de flujo y ejecuta las acciones para esta y luego termina el proceso *OpenFlow Pipeline*. La entrada de flujo puede tener una instrucción que le indique seguir en busca de coincidencias, de esa forma el proceso *OpenFlow Pipeline* no termina [42].

2.4.3.2 Comunicación del Protocolo *OpenFlow*

Este protocolo maneja 3 clases de mensajes. El primero es controlador a conmutador (*controller-to-switch*), en el cual los mensajes se inician en el controlador y se usan para una gestión directa o para verificar el estado del conmutador. El segundo es asíncrono (*asynchronous*), donde los mensajes se inician en el conmutador y se usan para actualizar el controlador según las acciones de la red y los cambios en el estado del conmutador. El tercero es simétrico (*symetric*), donde los mensajes se inician en el conmutador o en el controlador y se envían sin solicitud [42]. A continuación se describen mejor estas 3 clases de mensajes:

- a) Controlador a conmutador (*Controller-to-switch*): los mensajes son iniciados en el controlador y el conmutador puede tener respuesta a estos o no [42]. Estos son:
- Características (*Features*): el controlador solicita la identidad y características básicas de un conmutador por medio de una solicitud de características y el conmutador debe responder a esta solicitud. Esta es una acción común cuando se establece el canal OpenFlow.
 - Configuración (*Configuration*): el controlador puede establecer y consultar los parámetros de configuración en el conmutador. Cabe aclarar que el conmutador solo responde a consultas del controlador.
 - Modificar estado (*Modify-State*): los mensajes de este estado se envían desde el controlador para gestionar el estado de los conmutadores con el fin de añadir, borrar y modificar las entradas de flujo y eliminar o insertar las acciones de las tablas de OpenFlow. También se establecen las propiedades del puerto del conmutador.
 - Leer estado (*Read-state*): el controlador usa los mensajes de este estado para recoger información (configuración actual, estadísticas y capacidades) de los conmutadores [42].
 - Paquete de salida (*Packet-out*): el controlador usa estos mensajes para enviar paquetes desde un puerto específico del conmutador y para reenviar los paquetes recibidos por medio de mensajes de paquete de entrada (*Packet-in*).
 - Barrera (*Barrier*): el controlador usa los mensajes de solicitud o respuestas de barrera para garantizar el cumplimiento de las dependencias de un mensaje se cumplan y para recibir notificaciones de las operaciones terminadas.
 - Solicitud de Rol (*Role-Request*): el controlador usa estos mensajes para establecer el rol del canal OpenFlow, para establecer el ID de controlador y para consultarlo.
 - Configuración asíncrona (*Asynchronous-Configuration*): el controlador usa estos mensajes para filtrar los mensajes asíncronos que se reciben en el canal OpenFlow [42].
- b) Asíncrono (*Asynchronous*): estos mensajes son enviados sin la solicitud del controlador desde un conmutador. Los conmutadores envían este tipo de mensajes a los controladores para indicar la llegada del paquete o para indicar el cambio en el estado del conmutador [42]. A continuación se describen los tipos de mensajes asíncronos más importantes:
- Paquete de entrada (*Packet-in*): el conmutador envía este mensaje al controlador, notificando la entrada de un paquete sin coincidencias (*Match Fields*). Se transfiere el control del paquete al controlador y este responde con un mensaje enviado (*send-packet*).

- Flujo eliminado (*Flow-Removed*): mensaje de notificación de un conmutador al controlador cuando el tiempo de un flujo se termina [42].
 - Estado del puerto (*Port-Status*): mensaje de notificación de un conmutador al controlador cuando hay un cambio en el estado de un puerto. Los cambios pueden ser en los eventos de configuración de un puerto.
 - Estado del Rol (*Role-Status*): mensaje de notificación de un conmutador al controlador cuando hay un cambio en el estado de un rol. Se da cuando se elige un nuevo controlador maestro y el conmutador envía mensajes de estado de rol al anterior controlador maestro.
 - Estado del controlador (*Controller-Status*): mensaje de notificación de un conmutador al controlador cuando hay un cambio en el estado de un canal OpenFlow en cualquier conmutador.
 - Monitor de flujo (*Flow-Monitor*): mensaje de notificación de un conmutador al controlador cuando hay un cambio en una tabla de flujo. El controlador puede definir un conjunto de monitores encargados de encontrar los cambios en las tablas de flujo [42].
- c) Simétrico (*Symetric*): estos mensajes son enviados en cualquier dirección y sin solicitud [42].
- Hola (*Hello*): estos mensajes se intercambian entre el conmutador y el controlador al iniciar la conexión.
 - Eco (*Echo*): estos mensajes se utilizan para verificar que la conexión entre el controlador y el conmutador sea estable. También se usan para medir latencia o ancho de banda. Desde el conmutador o el controlador es posible enviar los mensajes eco (solicitud, respuesta).
 - Error: aunque los conmutadores hacen mayor uso de estos mensajes, también se pueden enviar desde el controlador. Este tipo de mensajes sirven para notificar problemas al otro lado de la conexión y el conmutador los usa para notificar una falla de solicitud iniciada por el controlador.
 - Experimentador (*Experimenter*): estos mensajes proporcionan funcionalidades adicionales al conmutador dentro del espacio de tipo de mensaje [42].

2.4.4 Arquitectura SDN

Principalmente se tiene un controlador que revisa por medio de reglas definidas los flujos de datos mientras que los dispositivos de red reciben instrucciones del controlador y las aplican. Esta arquitectura se basa en la gestión que ejerce el controlador sobre toda la red, con el fin de establecer los patrones de flujo debido a la comunicación del controlador y los conmutadores mediante el protocolo *OpenFlow* [38]. Todo este funcionamiento se observa en la Figura 2.7 a continuación.

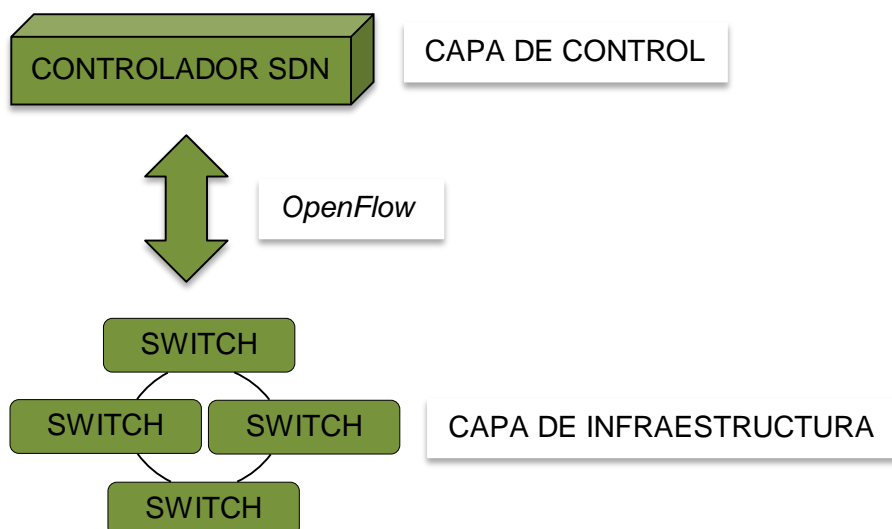


Figura 2.7 Arquitectura básica SDN. Adaptada de [38].

La arquitectura SDN se basa principalmente en un conjunto de planos y capas. En la Figura 2.8 se observa la distribución de la arquitectura SDN.

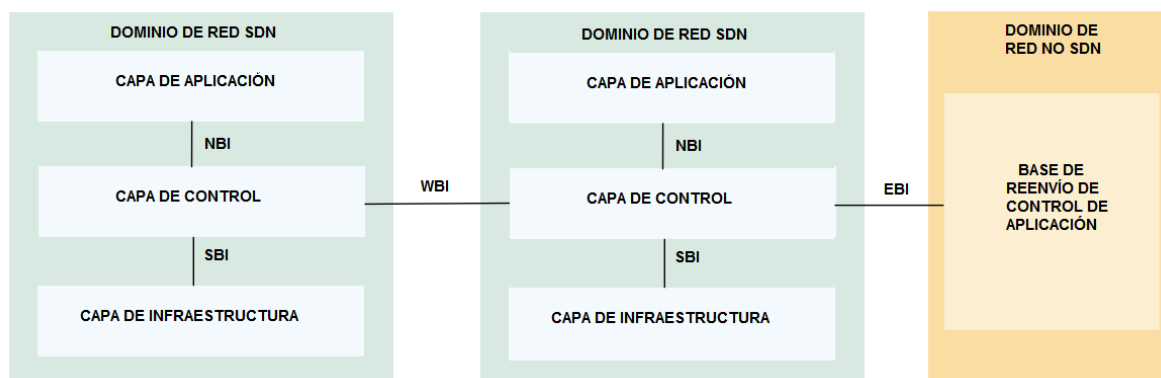


Figura 2.8 Distribución de la Arquitectura SDN. Adaptada de [43].

En la Figura 2.8 se observa que los dominios de red SDN se interconectan por medio de la WBI y un dominio de red SDN se interconecta con un dominio de red no SDN por medio de la EBI. En cada capa de infraestructura se encuentra el plano de datos donde se puede contar con elementos como conmutadores *OpenFlow*. Interconectados con una SBI se encuentran la capa de infraestructura y la capa de control. Esta última alberga el plano de control donde se encuentra el controlador SDN. La NBI Interconecta la capa de control con la capa de aplicación. El único dominio de red no SDN alberga en su interior la base de reenvío de control de aplicación donde se encuentran las pasarelas (*Gateways*¹⁰) exteriores e interiores.

¹⁰ Pasarela (*Gateway*): puerta de enlace, actúa como interfaz de conexión entre dispositivos, y permite compartir recursos entre dos o más dispositivos. Las pasarelas proveen de una red local a los dispositivos conectados con una red exterior.

2.4.4.1 Capa de Infraestructura

En esta capa las interfaces dirección sur (SBI, *SouthBound Interfaces*) son indispensables para la separación de la funcionalidad del plano de datos y del plano de control interconectando los elementos de control con los de reenvío. Se transfiere la inteligencia de la red al controlador SDN centralizado y las interfaces permiten que este programe de forma dinámica los dispositivos. Los equipos de red actúan como conmutadores y solo reciben instrucciones del controlador mejorando así la reconfigurabilidad de la red [5][41].

2.4.4.2 Capa de control

En esta capa se configuran los elementos de red por medio de las SBI, el controlador SDN identifica las instrucciones de conexión sur y configura la infraestructura de red de acuerdo a los requerimientos de la capa de aplicación. Los controladores solicitan información de las infraestructuras SDN con el fin de gestionar eficientemente la red. El controlador SDN tiene un sistema operativo de red (NOS, *Network Operating System*), que no tiene soporte SDN de implementación independiente. Una NOS proporciona virtualización, programación de aplicaciones y administración de las bases de datos. Una NOS basada en SDN es un sistema operativo de red abierta (ONOS, *Open Network Operating System*) con una arquitectura de control distribuida que opera preferiblemente en redes de área extensa (WAN, *Wide Area network*). Un punto importante dentro del plano de control es la interconexión del controlador SDN y un entidad de software que opera en la capa de aplicación por medio de la interfaz dirección norte (NBI, *NorthBound Interface*) [5][41].

2.4.4.3 Capa de Aplicación

En esta capa las aplicaciones de red y los servicios utilizan el plano de control y así, sobre la infraestructura física o virtual ejercen funciones de red. Con el fin de facilitar la ejecución de las funcionalidades de la aplicación, el controlador SDN presenta una vista abstracta de la red a las aplicaciones SDN. Se incluyen niveles más altos de administración de red y así se pueden tener análisis de datos de red o funciones especializadas que requieren procesamiento en grandes centros de datos [5][41].

2.4.5 Aspectos a tener en cuenta para la selección del controlador SDN

Es fundamental para el diseño de una red SDN seleccionar un controlador. Para esta selección se deben evaluar los siguientes aspectos:

- Soporte *OpenFlow*: se necesita que los administradores de red conozcan las características de las versiones de OpenFlow que el controlador soporta y la posibilidad para migrar a una versión de OpenFlow actual [43].
- Virtualización de Red: debe ser posible crear dinámicamente redes virtuales basadas en política, con el fin de cumplir una serie de requerimientos. La virtualización de servidores abstrae y une los recursos computacionales de la misma manera que en las redes virtuales creadas se deben abstraer y unir los recursos de la red [43].

- Funcionalidad de la Red: a partir de los campos de la cabecera de OpenFlow el controlador toma decisiones con el fin de lograr mayor flexibilidad en la red en términos del enrutamiento de los flujos. El controlador debe definir los parámetros de calidad de servicio flujo por flujo. Se debe aumentar el rendimiento y la escalabilidad de la red, para lograrlo el controlador SDN descubre múltiples caminos por donde se transporta el flujo desde su origen hasta su destino y divide el tráfico del flujo a través de múltiples enlaces [43].
- Escalabilidad: el controlador SDN debe soportar un mínimo de 100 conmutadores y debe mitigar la sobrecarga de transmisión de red y el crecimiento de las entradas de las tablas de flujo [43].
- Rendimiento: el controlador SDN debe completar previamente las tablas de flujo y debe contar con capacidades de procesamiento y de entrada y salida. Estas capacidades aseguran que el controlador no sea un cuello de botella en la creación de entradas de flujo [43].
- Programación de la red: el controlador debe permitir aplicar a los paquetes un filtrado sofisticado y debe tener la capacidad de redirigir el tráfico. Es fundamental contar con interfaces dinámicas de programación para el controlador [43].
- Confiabilidad: al controlar la topología de la red, el controlador SDN puede descubrir múltiples caminos desde el origen hasta el destino. Cuando el controlador descubre estos caminos y establece numerosas rutas la disponibilidad de la red no se ve afectada por la interrupción de un solo enlace. En el caso de tener solamente una ruta establecida el controlador debe ser capaz de redirigir el tráfico hasta otro enlace que se encuentre activo [43].
- Seguridad de la red: el controlador SDN debe soportar la autenticación y autorización por parte del administrador de la red. Por otra parte debe limitar las comunicaciones de control con el fin de detectar un ataque malicioso [43].
- Gestión centralizada y visualización: el controlador SDN debe utilizar los datos ofrecidos por el protocolo *OpenFlow* para identificar problemas en la red y ser capaz de modificar una ruta automáticamente, también debe definir el tipo de tráfico que se va a controlar. Otra capacidad del controlador SDN es visualizar los enlaces físicos de la red y las redes virtuales ejecutadas en la red física [43].
- Fabricante del controlador SDN: el controlador debe ser de buena calidad, y debe adaptarse al entorno SDN que es de constantes cambios [43].

2.4.6 Clases de Controladores SDN

Así como se ha explicado a lo largo del documento, la gestión en una SDN se hace a partir de una aplicación de software conocida como un controlador SDN. En la actualidad se cuenta con numerosos controladores SDN, los cuales ayudan a mejorar la compatibilidad entre dispositivos en una red y así cumplen con una de las metas de SDN. A continuación se describen algunos controladores SDN.

2.4.6.1 Controlador NOX

NOX fue el primer controlador para OpenFlow y es una plataforma que permite crear aplicaciones para el control de la red. Este controlador se gestiona a través de la programación de conmutadores en la red. El funcionamiento se basa en la generación de eventos que permiten controlar un proceso que llega a este controlador [44].

2.4.6.2 Controlador POX

POX permite una mejor interacción con los conmutadores OpenFlow y es una plataforma de desarrollo rápido en la cual se crean prototipos de software de control de red. Este controlador mantiene una interfaz de programación de aplicaciones (API, *application programming interface*) estable aunque todavía se encuentra en desarrollo [45].

2.4.6.3 Controlador *Beacon*

Beacon permite iniciar y detener aplicaciones mientras se ejecuta, además de esto puede agregar aplicaciones y retirarlas sin finalizar su propia ejecución. Tiene un enfoque manejable para el desarrollo, con un rendimiento alto [46].

2.4.6.4 Controlador *Floodlight*

Floodlight permite modificar el comportamiento de los dispositivos de red por medio de instrucciones de reenvío definidas. Este controlador tiene un diseño de alto rendimiento y es capaz de controlar e investigar la red a partir de sus funcionalidades. Las aplicaciones que en este se ejecutan presentan características que pueden resolver necesidades de los usuarios, por ejemplo la facilidad de configuración con dependencias mínima y la gestión de múltiples agrupaciones de conmutadores con hardware OpenFlow [46][47].

2.4.6.5 Controlador RYU

RYU permite el desarrollo de aplicaciones de control y administración de redes por medio de una API bien definida. Este controlador permite la integración con diferentes componentes de desarrollo y también la modificación e implementación de nuevos componentes. RYU crea paquetes OpenFlow y gestiona eventos con los paquetes que entran y salen. Las aplicaciones de RYU manejan un intercambio constante de eventos asíncronos [45][48].

2.4.6.6 Controlador *OpenDayLight*

OpenDayLight permite el desarrollo de aplicaciones por medio de una API sobre la NBI y es compatible con la SBI al utilizar el protocolo OpenFlow. Además, el proveedor conecta sus propios protocolos como nuevos módulos en OpenDayLight para la comunicación en las NBI y SBI. El protocolo OpenFlow maneja toda la comunicación en las WBI y EBI de OpenDayLight. El controlador OpenDayLight prioriza los requisitos de seguridad y se encarga de la prevención y la detección de ataques de denegación de servicios (DoS, *Denial of Service*) [49]. A continuación se presenta una tabla comparativa de los controladores anteriormente relacionados:

Tabla 2.3 Comparación (Teórica) de los controladores SDN. Adaptada de [45][50][51].

CONTROLADOR	NOX	POX	Beacon	FloodLight	RYU	OpenDayLight
CARACTERÍSTICA						
Lenguaje de programación	C++	Python	Java	Java	Python	Java
Compatibilidad con Linux	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Compatibilidad con Mac OS	x	✓	✓	✓	x	✓
Compatibilidad con Windows	x	✓	✓	✓	x	✓
Interfaz OpenFlow	✓ v 1.0	✓ v 1.0	✓ v 1.0	✓ v 1.0, 1.3	✓ v 1.0, 1.2, 1.3, 1.4	✓ v 1.0, 1.3, 1.4
Control Distribuido	x	x	x	x	x	✓
Control Centralizado	✓	✓	✓	✓	✓	x
GUI	PythonQT4	PythonQT4	Web	Web	✓	Web
Modularidad	Baja	Baja	Media	Media	Media	Alta
Documentación	Mala	Mala	Media	Buena	Media	Muy Buena

2.5 SOFTWARE DEFINED OPTICAL NETWORKING (SDON)

Las SDN son un cambio de paradigma en el campo de las redes de telecomunicaciones. Las Redes Ópticas juegan un papel importante en la tecnología moderna de la información debido a su alta capacidad de transmisión. Nuevos retos se plantean en la búsqueda de la centralización y el manejo de las redes ópticas debido a las características ópticas de transmisión y conmutación específicas como los circuitos, las ráfagas y los paquetes [5][52].

La demanda del tráfico en las redes ópticas ha incrementado rápidamente, y este crecimiento continuará sin parar. Para dar cabida a la creciente inestabilidad del tráfico de gran volumen, las redes ópticas de transporte definidas por software que tienen una gran capacidad, un gran ancho de banda y baja latencia, son la mejor opción [53][54].

2.5.1 Definición de SDON

Una Red óptica definida por software (SDON, *Software Defined Optical Networking*), se define como aquella que extiende SDN a redes ópticas, proporcionando un control centralizado (inteligente y flexible) basado en SDN, control que soluciona las complejidades de administración y aprovisionamiento [5].

Las SDON's permiten a los operadores de red controlar la red utilizando software que se ejecuta en un sistema operativo de red, lo que permite una manera de control más flexible. Por lo tanto, SDON permite a los operadores de red y proveedores de servicios personalizar su infraestructura dinámicamente de acuerdo con los requisitos de la aplicación. Mientras tanto, SDON divide la red en plano de control y plano de datos [55][56].

Los estudios de SDON están basados principalmente en tres capas de red. Estas son la capa de infraestructura, la capa de control y la capa de aplicación. Las SDON buscan aprovechar la flexibilidad del control SDN para soportar aplicaciones de red con una infraestructura de red óptica subyacente [5]. Los desarrollos en la capa de infraestructura y SDN son complementarios porque el control basado en SDN y la optimización centralizada son necesarios para utilizar completamente las flexibilidades ofrecidas por la capa de infraestructura [52].

2.5.2 Características de SDON

A continuación se describen características importantes (secciones 2.5.2.1, 2.5.2.2, 2.5.2.3) de SDON que son de gran importancia para la virtualización de las funciones de red y su acoplamiento con la red óptica. También se hace una breve descripción de los componentes que permiten la conmutación óptica en SDON.

2.5.2.1 SDN/NFV

SDN y la virtualización de funciones de red (NFV, *Network Function Virtualization*) mejoran la función de red y el ajuste dinámico de los recursos de la red. SDN proporciona una abstracción de los recursos de red a través de interfaces de programación de aplicaciones. Esta abstracción permite a SDN realizar la virtualización de red, es decir, dividir la infraestructura física y crear múltiples redes de inquilinos virtuales (VTN, *Virtual Tenant Network*) con requisitos específicos de calidad de servicio e independientes de la tecnología de transporte óptico y los protocolos de red. Por medio de NFV se implementan funciones de red en hardware especializado y dedicado¹¹. Las funciones de control se pueden virtualizar y mover a la nube como una función de red virtual (VNF, *Virtual Network Function*). El control de una VTN es un requisito en la virtualización de la red, ya que permite la programación dinámica de los recursos virtuales asignados a la VTN [57].

2.5.2.2 Extensión SDN a redes ópticas

Para extender los conceptos de SDN hacia una arquitectura de red de transporte óptico, se debe tener en cuenta la complejidad de las implementaciones del plano de control, la disponibilidad del ancho de banda y la granularidad¹² de la red. Durante esta extensión se debe tener en cuenta si las aplicaciones funcionan de forma correcta cumpliendo los requisitos de conectividad, ancho de banda y calidad de servicio. Se deben analizar las aplicaciones que calculan una ruta de conexión y configuración y las aplicaciones de transporte de red privada virtual (VPN, *Virtual Private Network*). Para aumentar la eficiencia de la red se requiere cumplir con los requerimientos de rendimiento de la red y la utilización de recursos de la red. Se debe tener una asignación dinámica de los recursos en la red y así los recursos que no son utilizados por algunas aplicaciones puedan ser reasignados a otras [58].

2.5.2.3 Componentes de red para la conmutación en la SDON

Con el fin de tener una conmutación controlada en la SDON se hace uso de los siguientes componentes de red:

- Multiplexor Óptico Reconfigurable de Extracción e Inserción (ROADM, *Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer*): es un importante dispositivo de conmutación para

¹¹ Hardware especializado y dedicado como instancias de software llamadas funciones de red virtuales (VNF) que se ejecutan en servidores básicos (por ejemplo, en centros de datos) mediante técnicas de virtualización de software.

¹² Granularidad: es un aspecto muy importante dentro de la conmutación de las redes ópticas, este aspecto se refiere a la forma como se realizan las conexiones entre fuente y destino.

redes ópticas. A través de conmutadores ópticos selectivos de longitud de onda, un ROADM puede extraer o insertar uno o múltiples canales de longitud de onda que transportan señales de datos ópticos desde y hacia una fibra sin requerir la conversión de la señal óptica en señales eléctricas [59].

- Conmutador de Transporte abierto (OTS, *Open Transport Switch*): es un diseño de conmutador virtual óptico habilitado para OpenFlow. OTS abstrae los detalles de la capa de conmutación física subyacente (que podría ser conmutación de paquetes o conmutación de circuitos) a un elemento conmutador virtual. El diseño de OTS introduce tres módulos (detección, control y plano de datos) para interactuar con el hardware de conmutación física. Estos módulos se gestionan desde un controlador SDN a través de mensajes OpenFlow [60].
- Franja x lógica (*Logical xBar*): representa un conmutador programable. Si se trata de una xBar elemental (o xBar pequeña) podría consistir en un solo conmutador OpenFlow. Múltiples xBar pequeñas se pueden combinar para formar un único xBar grande con una única tabla de reenvío. Las franjas xBar son los bloques de construcción para formar grandes redes [61].
- Caja blanca óptica (*Optical White Box*): es un conmutador conocido como el bloque de construcción software para una red óptica. Este combina un plano programable con elementos programables de un nodo [62].
- Conmutador virtual de Red Óptica Pasiva con Capacidad de Gigabit (GPON, *Gigabit-capable Passive Optical Network*) (*GPON Virtual Switch*): es un conmutador en el cual la tecnología GPON es totalmente programable similar a un conmutador convencional OpenFlow, es decir se abstrae todo el GPON en un conmutador OpenFlow virtual. El control SDN interactúa con el conmutador GPON virtual como si fuera un conmutador OpenFlow estándar [63].
- Nodo de red de acceso flexible (*Flexi Access Network Node*): es un nodo que agrupa de forma flexible los flujos de tráfico de una amplia gama de redes, como redes de área local y estaciones base de redes inalámbricas. Este nodo tiene capacidades de transmisión eléctrica y óptica que pueden controlarse a través de SDN, y sirve como un nodo de agregación efectivo en las redes de acceso metropolitano. Así, el tráfico que está destinado a otros nodos en el área de cobertura de una red de acceso puede ser enviado directamente a la red de acceso [64].

2.5.3 Arquitecturas SDON

En las arquitecturas SDON es posible aplicar los principios de SDN pero la ejecución de las aplicaciones es determinada por las características de las redes ópticas subyacentes. Estas arquitecturas contienen múltiples canales en un amplio espectro y permiten conmutar fibras y puertos. En ocasiones la calidad de la transmisión y las rutas no se pueden fijar debido a trastornos que experimenta la conmutación óptica [58].

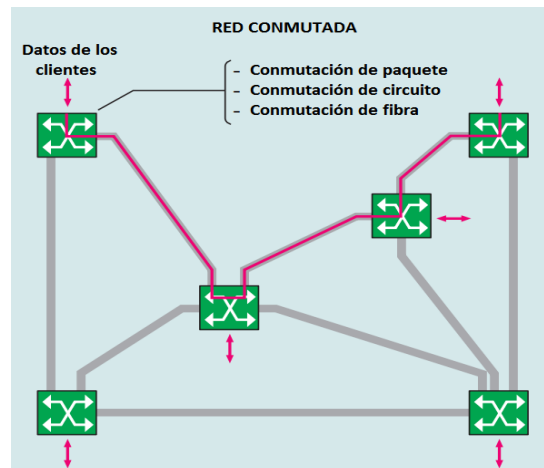


Figura 2.9 Arquitectura 1: Red Conmutada. Tomada de [58].

La Figura 2.9 muestra una red de conmutación donde la granularidad de conmutación puede ser de paquete, de intervalo de tiempo o de fibra.

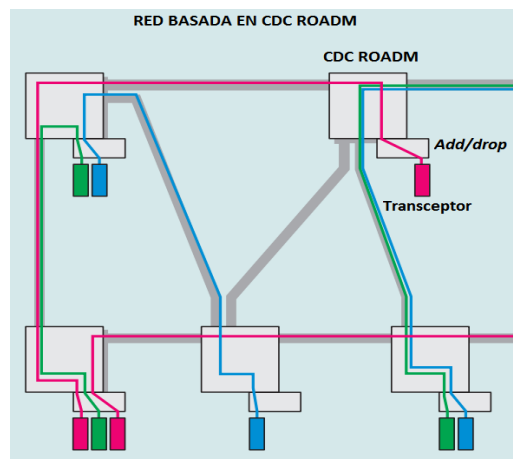


Figura 2.10 Red basada en CDC ROADM. Tomada de [58].

En la arquitectura de la Figura 2.10, la conmutación de longitud de onda se implementa como un ROADM, que a través de un nodo puede extraer o insertar longitudes de onda (*Add/drop*). Existen distintas estructuras de *Add/drop*; estos son multiplexores simples o multiplexores que extraen o insertan longitudes de onda sin tener en cuenta el color, la dirección (entrada o salida) y la reutilización del color desde cualquier dirección. Esta estructura *Add/drop* se conoce como incolora, sin dirección y sin contención (CDC, *colorless*, *directionless*, and *contentionless*). En la Figura 2.10 se inserta un servicio de longitud de onda en un nodo de entrada, el cual se conmuta en la red y luego se extrae en un nodo de salida. La arquitectura de esta figura permite la configuración automática de una longitud de onda entre puntos finales pero con una estructura de control lenta. El rendimiento del transceptor determina el alcance del circuito y la ventaja de esta arquitectura es que los recursos del transceptor no se fijan entre dos puntos finales, sino que se pueden reutilizar dinámicamente en función de las demandas de tráfico [58].

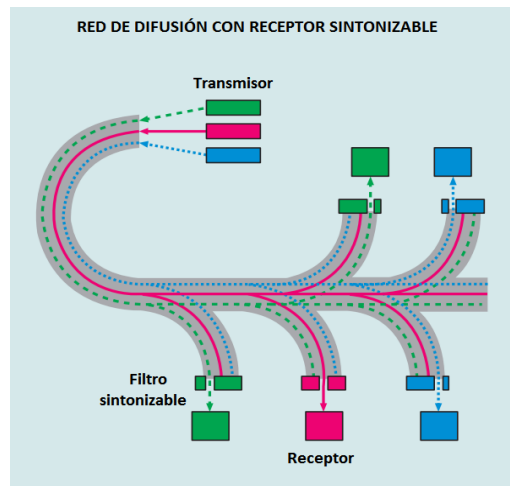


Figura 2.11 Red de difusión con receptor sintonizable. Tomada de [58].

La arquitectura de la Figura 2.11 es una red conmutada de longitud de onda con topología de árbol sobre la cual se transmite ópticamente a cada destino, en esta el receptor selecciona la longitud de onda deseable a través del filtro sintonizable, el cual determina el rendimiento de esta arquitectura [58].

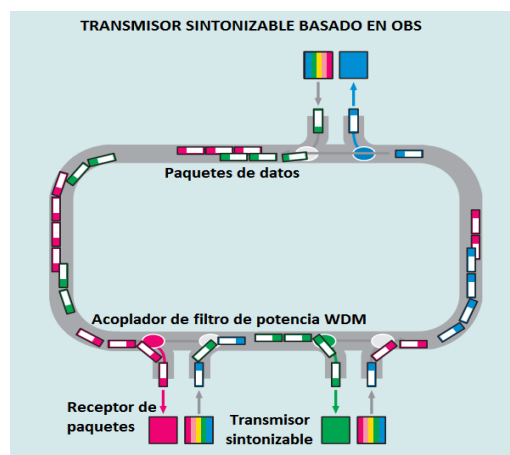


Figura 2.12 Transmisor sintonizable basado en OBS. Tomada de [58].

La arquitectura de la Figura 2.12 es una red conmutada de sublongitud de onda basada en OBS con un transmisor sintonizable, en la cual los destinos tienen colores fijos, y el transmisor sintoniza el color en función del destino deseado. Este tipo de arquitectura se usa mayormente con topologías de anillo de varios cientos de kilómetros de diámetro. En esta se requiere un sistema de detección de portadora para evitar que múltiples transmisiones lleguen a un mismo destino y se transmiten sobre la misma longitud de onda [58].

CAPÍTULO 3. ENRUTAMIENTO Y ASIGNACIÓN DE ESPECTRO EN REDES OPS

3.1 REDES POR CONMUTACIÓN ÓPTICA DE PAQUETES (OPS)

En búsqueda de la optimización de los recursos ópticos, se genera cierto interés en el tratamiento óptico que recibe la información cuando atraviesa un nodo de conmutación de la red troncal (que no es originado ni es el destino del nodo). En la literatura se encuentran tres alternativas que se han nombrado “Conmutación O-O-O” y se nombran: Conmutación Óptica de Circuitos (OCS, *Optical Circuit Switching*), Conmutación Óptica de Ráfagas (OBS, *Optical Burst Switching*) y Conmutación Óptica de Paquetes (OPS, *Optical Packet Switching*) [65].

En la conmutación óptica de circuitos (OCS) se realiza la reserva de recursos necesarios para una conexión entre nodo de origen y destino (nos expresa transmisión orientada a conexión), de tal manera que no es necesario almacenamiento óptico en los nodos intermedios. El gran problema de la OCS es que solo se puede transmitir un paquete por cada conexión, por lo tanto se convierte en una gran desventaja frente a otros protocolos. Por ende, cuando se requiere transmisión de paquetes IP, el procedimiento se torna complejo al presentarse muchos retardos cuando se establecen las conexiones por cada paquete [65].

Observando el gran problema presentado por la OCS, en la literatura se propone la conmutación óptica de paquetes (OPS) como una técnica de conmutación para tratar de corregir y mejorar las falencias de OCS, suprimiendo las capas intermedias y redirigiendo IP sobre la capa óptica. Sin embargo este tipo de conmutación presenta problemas, puesto que en las redes no se puede realizar un almacenamiento completo de datos en el dominio óptico y esto agregaría complejidad al proceso de transmisión. Por lo tanto, para lograr un equilibrio entre las técnicas OCS y OPS surge la conmutación óptica de ráfagas (OBS) que busca evitar la conversión óptico-eléctrico y eléctrica-óptica (O/E/O) en cada nodo de conmutación. Esta técnica mejora el rendimiento de la red, agregando paquetes que tienen el mismo destino en una misma ráfaga; así, sólo se realiza la conversión óptica-eléctrica de un encabezado que indicará el destino de conmutación, disminuyendo los retardos en las conexiones de red [65].

Finalmente, aunque en la literatura se consideran numerosos problemas en la implementación de la conmutación óptica de paquetes (OPS), ésta es una de las más fuertes alternativas en el presente, ya que se adapta a las estadísticas de tráfico de las redes de datos multimedia actuales. En términos generales OPS es similar a la técnica de conmutación de paquetes que opera bajo tecnología electrónica, con la excepción que la carga de datos del paquete siempre permanece en estado óptico en los nodos centrales de la red. Sin embargo esto agrega un grado complejidad mayor ya que implica almacenamiento óptico mientras las cabeceras son procesadas en los nodos de la red. Cabe resaltar que para lograr el procesamiento de los paquetes en los nodos de la red teniendo en cuenta las velocidades actuales, se deben tener estrictos protocolos de transmisión que permitan culminar con éxito las conexiones [65].

3.1.1 Arquitectura de Redes OPS

La arquitectura de las redes OPS propone varios escenarios, que se soportan en conceptos relevantes de arquitecturas y protocolos de red sobre una capa óptica para la conmutación de paquetes ópticos, como también en el crecimiento exponencial que se observa en la comunicación de datos.

En la figura 3.1 se puede observar el encaminamiento que reciben dos conexiones en la red desde A y B hacia C; se conforman paquetes a partir de la información de usuario (ATM¹³, IP) en las unidades de interconexión. Posteriormente en los nodos de frontera se realiza la multiplexación (nodos de entrada) o demultiplexación (nodos de salida) del flujo de paquetes ópticos. Luego, los nodos de núcleo aportan las facilidades necesarias de conmutación de datos con altas tasas de transferencias de bits para interconectar enlaces WDM, que pueden ser adicionados o extraídos en un determinado nodo por medio de multiplexores de adición-extracción de longitud de onda (OADM, *Optical Add-Drop Multiplexer*). Finalmente, las matrices de conmutación óptica (*Optical Cross Connect*, OXC) brindan la conectividad necesaria para las transmisiones en la red troncal.

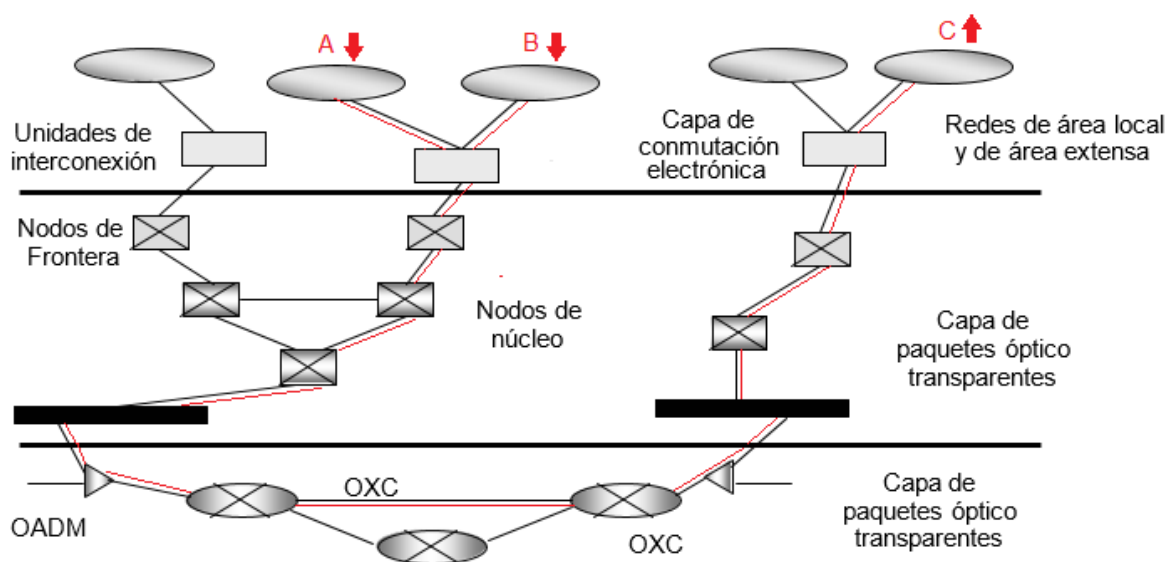


Figura 3.1 Arquitectura de red OPS. Adaptada de [66].

3.1.2 Nodo Frontera OPS

En la literatura aquellas conexiones de tráfico entre extremos de una red troncal OPS, se establecen mediante un circuito virtual permanente llamado camino de paquetes ópticos (OPP¹⁴, *Optical Packet Path*). Cuando se sigue la secuencia de saltos, se encuentran: el nodo de frontera de entrada (*ingress*) y el nodo de frontera de salida (*egress*) [65]. En el nodo de frontera de entrada se agregan los paquetes y se almacenan para su posterior transmisión. Luego, el circuito de establecimiento de etiqueta determina la longitud de onda para cada paquete IP y se envía al núcleo de red. En el nodo de frontera de salida se realiza el proceso inverso, es decir, se reciben y demultiplexan los paquetes para finalmente enviarlos a las redes cliente tales como SDH, ATM, IP o MPLS.

¹³ ATM: *Asynchronous Transfer Mode*. Modo de transferencia Asíncrona. Red orientada a la conexión, concebida para el envío de voz, video y datos con pérdida de paquetes baja, moderada y alta respectivamente.

¹⁴ OPP: es un tipo de circuito virtual permanente mediante el cual se establecen las conexiones de tráfico entre extremos de una red troncal OPS.

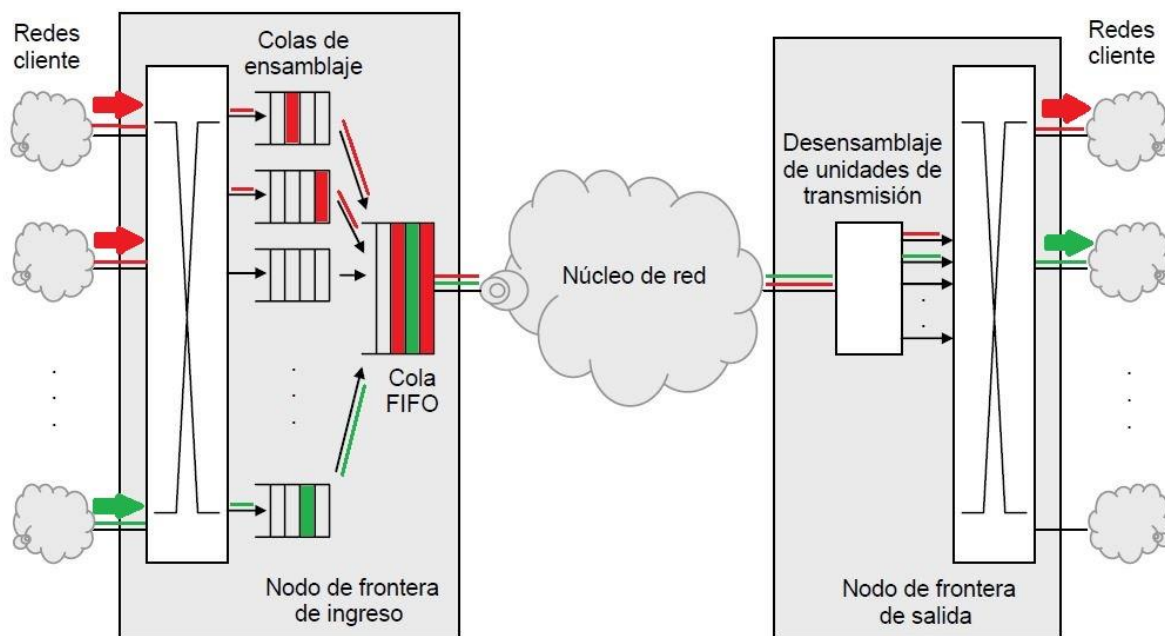


Figura 3.2 Arquitectura genérica de los nodos de frontera de entrada y salida. Adaptada de [66].

3.1.2.1 Ensamble de Paquetes

En la red de conmutación de paquetes ópticos, los nodos de frontera son aquellos que realizan las funciones de interfaz entre las redes cliente y el núcleo de la red óptica. El tráfico que llega desde las distintas redes cliente, como se puede observar en la figura 3.2 se une en los nodos de frontera y se envía a través de la red de conmutación de paquetes ópticos, donde se procesan con una etiqueta para realizar el correspondiente encaminamiento hasta su destino. En el caso que un nodo frontera no tenga ningún mecanismo de conformación de tráfico, cada paquete con su etiqueta se enviará al núcleo de la red óptica por medio de una cola tipo “primero en entrar, primero en salir” (FIFO, *First In-First Out*). El tráfico absoluto suministrado por las fuentes, es decir por las redes cliente se puede llamar un proceso único de agregación o conformación de tráfico. Cuando se observan las características de dicho tráfico, se puede analizar y encontrar cierta similitud en el tráfico procesado pero también cierta irregularidad en la longitud de los paquetes. Teniendo en cuenta lo anterior, se debe tener presente esquemas de solución de colisiones para que sean altamente efectivos, especialmente cuando se manejen altas cargas de tráfico; de esta manera al considerar las prestaciones adicionales de los nodos de frontera, estos deben contribuir a disminuir la autosimilitud de tráfico IP óptico con el fin de optimizar el perfil de tráfico.

En la conformación de tráfico se busca el ensamble de unidades de transporte conformadas por agregación de paquetes ópticos con características similares. El valor de la máxima unidad de transmisión (MTU, *Maximum Transmission Unit*) debe ser mayor a dichos paquetes con el fin de evitar posibles procesos de segmentación en los paquetes a transportar. De esta manera en los nodos de frontera se pueden ensamblar múltiples paquetes IP con la misma clase equivalente de transmisión (FEC, *Forwarding Equivalent Class*) y con atributos en común, como por ejemplo: la calidad de servicio (QoS, *Quality of*

Service). Cuando la cola de embalaje alcanza el valor máximo de agrupación asignado por el MUT, el nodo de frontera le asigna una etiqueta que contiene la información para su respectivo encaminamiento que puede incluir atributos como la prioridad, la duración, clase, etc. Una vez el paquete ha arribado al nodo de frontera de salida, se desensambla, se obtienen los paquetes IP y se envían a sus respectivos destinos en las redes cliente. En la figura 3.3 se puede apreciar la arquitectura y el proceso que llevaría el ensamble de paquetes IP [66].

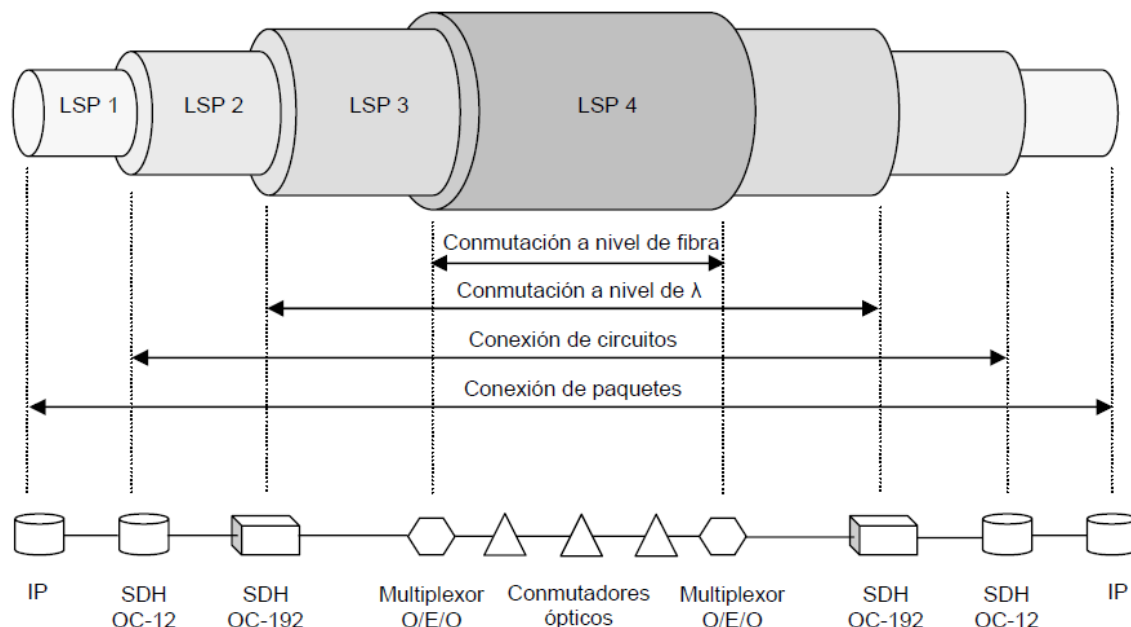


Figura 3.3 Esquema jerárquico de LSPs en GMPLS. Tomada de [66].

3.1.2.2 Señalización

En la señalización para la conmutación de paquetes en redes ópticas, se tiene en consideración la generalización de la conmutación de etiquetas multiprotocolo (GMPLS, *Generalized Multiprotocol Label Switching*); ésta se define como una tecnología de plano de control multiplataforma que brinda soporte a dispositivos que efectúan conmutación de paquetes, tiempo, espacio y longitud de onda. Sin embargo para abarcar los conmutadores ópticos deben realizarse ciertas modificaciones, de las cuales se hablará brevemente a continuación [66].

- Un protocolo de gestión de enlace (LMP, *Link Management Protocol*) en redes ópticas usando conmutadores ópticos.
- Un protocolo de reserva de recursos (RSVP, *Resource Reservation Protocol*) y un protocolo de distribución de etiquetas basada en restricciones (CR-LDP, *Constraint-based Routing Label Distribution Protocol*) para proveer ingeniería de tráfico que permita que los caminos ópticos (LSP, *Label Switched Path*) sean especificados puntualmente en la red óptica.
- Una extensión para los protocolos de encaminamiento más corto (OSPF, *Open Short Path First*), así mismo de sistemas intermedios (IS-IS, *Intermediate to Intermediate System*) que permitan conocer el estado de los recursos ópticos de la red [66].

En MPLS se separa el plano de datos y el plano de control. Por ejemplo, para el funcionamiento de conmutación a nivel de fibra, en la figura 3.3 se observa cómo se tendría un cambio de etiquetas multiprotocolo (LSP Multiprotocol, *Multiprotocol Label Switching Path*) que inicie y termine en una interfaz de conmutación de paquetes (LSP-Paquete, *Paquete Label Switching Path*), donde se pueda anidar con otros LSP-Paquete dentro de una interfaz de conmutación a nivel de multiplexación por división de tiempo (LSP-TDM, *TDM Label Switching Path*) donde a su vez se aniden en una interfaz de conmutación a nivel de longitud de onda (LSP-Landa, *Landa Label Switching Path*) y finalmente se anidan en una interfaz de conexión con conmutación a nivel de longitud de onda (LSP-Fibra, *Fiber Label Switching Path*). De esta manera se puede emplear y efectuar en cualquier elemento de la red utilizando dominios de conmutación de tiempo, espacio y longitud de onda [66].

De la misma manera que GMPLS opera en otros dominios como WDM, TDM, IP, MPLS, MPLambdaS se observa gran potencial para aplicar este protocolo en redes de conmutación de paquetes ópticos basadas en el intercambio de etiquetas. En la figura 3.4 se observa que se debe incorporar una extensión propia para reflejar las características de este tipo de red, que aún no están disponibles en otras tecnologías.

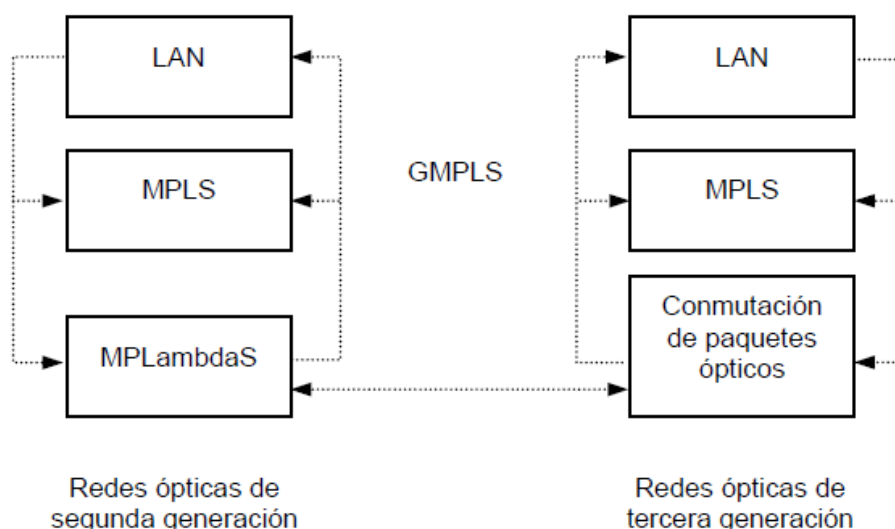


Figura 3.4 Esquema básico usando GMPLS en redes de OPS basado en el intercambio de etiquetas con redes de OCS. Tomada de [66].

3.1.2.3 Algoritmo de planificación: Ruta de longitud de onda dispersa

En el algoritmo ruta de longitud de onda dispersa (SCWP, *Scattered Wavelength Path*) las conexiones de la ruta de paquetes ópticos (OPP, *Optical Packet Path*) determinan la fibra de transmisión en cada salto, pero no la longitud de onda de salida. El sistema planificador de cada nodo puede seleccionar la longitud de onda de transmisión dinámicamente de cada paquete, según determinados criterios de eficiencia, como la ocupación de memorias. En SCWP se obtiene multiplexación estadística por medio de un algoritmo para la selección de canal de salida. Con este algoritmo se puede transmitir más de un paquete del mismo OPP simultáneamente con longitudes de onda distintas. Es necesario contar con un mecanismo que permita a un nodo conocer cuál es el orden entre paquetes llegados simultáneamente,

con el objetivo de mantener ese orden hasta el siguiente salto [65]; para esto se evalúan los algoritmos de planificación SCWP [67] y [68].

3.1.3 Nodo Central OPS

El nodo central permite el encaminamiento de paquetes desde cualquier puerto de entrada a cualquier puerto de salida. A continuación se presenta la configuración de un nodo central:

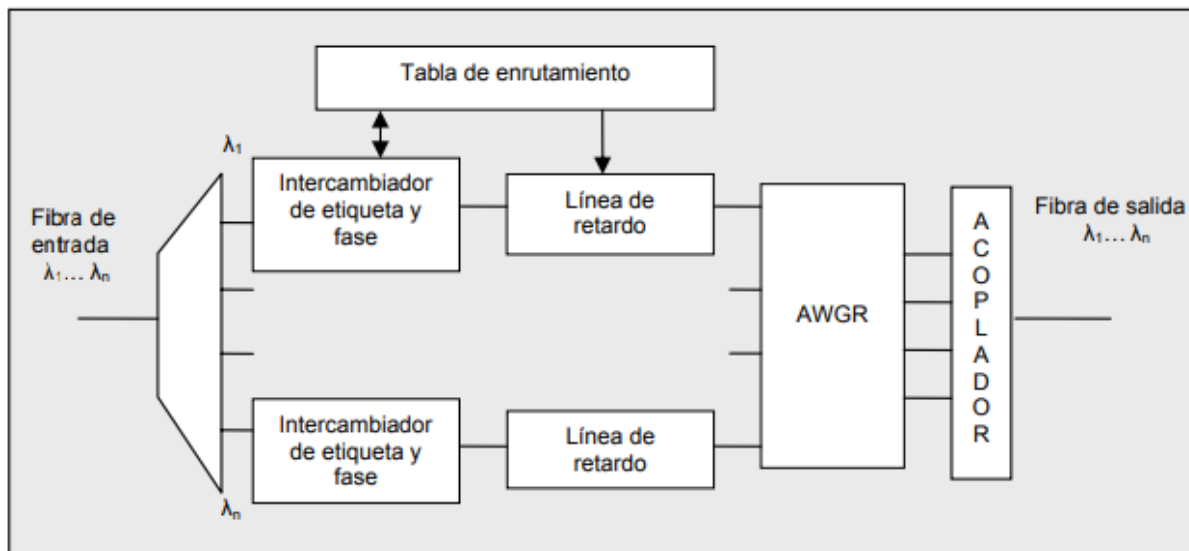


Figura 3.5 Arquitectura del nodo central OPS. Tomada de [66].

En el nodo central OPS la etiqueta codificada se examina y se genera una nueva etiqueta de acuerdo con la tabla de enrutamiento local. En la figura 3.5 el demultiplexor separa los canales ópticos de forma individual y una nueva etiqueta se asigna a cada paquete por medio del intercambiador de longitud de onda y de fase el cual está controlado por la tabla interna de encaminamiento [66].

3.1.4 Reserva de recursos para OPS

Para establecer y finalizar los LSP, se usan dos protocolos de reserva de recursos: el protocolo RSVP y el protocolo de distribución de etiquetas (LDP, *Label Distribution Protocol*). El funcionamiento de estos dos protocolos se basa en enviar un mensaje de establecimiento desde el nodo origen al destino del LSP a lo largo de la ruta deseada. En esta ruta, en cada uno de sus nodos se determina si hay o no recursos suficientes para soportar el LSP antes de enviar el mensaje de establecimiento al siguiente nodo. Al tener establecido el LSP se envía un mensaje de acuse de recibo (ACK, *Acknowledgement*) desde el nodo destino hasta el nodo origen a través de la ruta establecida [66].

3.2 RSA - ENRUTAMIENTO Y ASIGNACIÓN DE ESPECTRO PARA OPS/EON

En las redes ópticas de telecomunicaciones se presentan dos problemas cuando se desea establecer un enlace entre dos nodos siguiendo un camino óptico. El primer problema es conocido como enrutamiento (routing), que consiste en encontrar la mejor ruta para llegar al destino atravesando nodos intermedios para transportar la información. Por otro lado, en las redes WDM se debe asignar recursos espectrales dependiendo del ancho de banda requerido

por las solicitudes; a este proceso se le conoce como asignación de espectro (*Spectrum Allocation*). Los problemas de enrutamiento y asignación de espectro denominados de manera integral como RSA no son tema nuevo en el campo de las redes ópticas, pero cada vez tienen más relevancia en la búsqueda de la mejor solución posible [69].

RSA es considerado como una de las claves de funcionalidad para lograr transparencia de información y características de reuso del espectro. RSA es usado para encontrar la ruta apropiada y asignar los slots de espectro adecuados a la solicitud del camino óptico. Los algoritmos presentes en la literatura muestran dos caminos a seguir: el primero realiza de forma simultánea el enrutamiento y asignación de espectro (RSA) a un alto costo computacional, debido a la complejidad de los algoritmos, mientras que el segundo aborda el problema de forma secuencial realizando primero el enrutamiento y posteriormente la asignación del espectro (R + SA), disminuyendo la complejidad de los algoritmos y los recursos computacionales utilizados [70].

Por ende, en el presente trabajo de grado se abordará el problema de forma secuencial. Se realizará el enrutamiento y posteriormente la asignación del espectro mediante técnicas heurísticas que se afrontarán de forma minuciosa posteriormente.

3.2.1 Funcionamiento RSA

Para describir una red óptica FlexGrid: se debe tener en cuenta que el espectro óptico disponible se divide en ranuras (*slices*); generalmente son particiones con un ancho fijo de 6.25 GHz que se realizan para administrar el espectro. Cuando se habla de un slot se hace referencia a dos ranuras consecutivas. Dicho slot tiene una frecuencia central (CF). Para efectos de ilustración se muestra la figura 3.6.

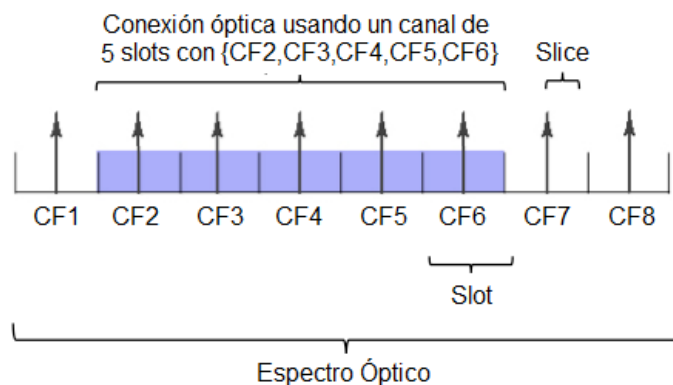


Figura 3.6 Representación lógica de un enlace de fibra óptica en FlexGrid. Adaptada de [17].

Para establecer una conexión óptica en una red FlexGrid con RSA, se busca una ruta con suficiente espectro para el ancho de banda requerido y se siguen los siguientes pasos: enrutamiento y asignación de recursos espectrales.

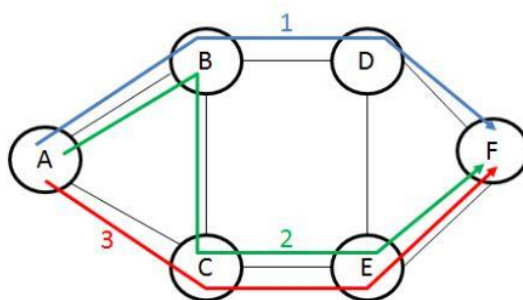


Figura 3.7 Topología de red con 6 nodos y 8 enlaces. Tomada de [71].

En la topología de la figura 3.6 se puede apreciar el comportamiento de una red estándar de 6 nodos que consta de 8 enlaces con algoritmos RSA. Se observan tres posibles rutas para establecer un enlace entre A-F dependiendo la disponibilidad de los nodos en cuestión: ABDF, ABCEF y ACEF.

La selección de ruta depende de la estrategia de asignación del espectro y FlexGrid comprende las siguientes:

Contigüidad del espectro: todos los slots de frecuencia adyacentes en el espectro que hacen parte de un canal en una conexión óptica.

Continuidad del espectro: cuando se asigna un canal en una transmisión, debe ser el mismo a través de toda la ruta para evitar conversiones electro-ópticas (E/O/E) de la señal en los nodos intermedios.

No superposición del Espectro: un slot de frecuencia en un enlace únicamente puede utilizarse para una conexión a la vez.

Espectro limitado: el número de slots en un enlace son finitos.

Bandas de guarda: al menos un slot es reservado entre conexiones para evitar interferencias.

Por medio de un ejemplo se ilustran los conceptos de continuidad y contigüidad. En la Figura 3.7 se necesita una conexión con cierto ancho de banda entre los nodos B y D que supondremos será satisfecho con dos slots de frecuencia. En busca de la ruta más óptima, generalmente se opta por la más corta, pero como se debe cumplir con ciertas condiciones, no siempre se escoge ésta. En éste ejemplo no se puede optar por la más corta, es decir por BAD porque slots de frecuencia entre AD no están disponibles y por ende no se garantiza continuidad del espectro. Evaluando otra posible solución se toma BACD donde la conexión cumple con la continuidad del espectro y la contigüidad, es decir los dos slots juntos para cumplir con el requerimiento de ancho de banda solicitado.

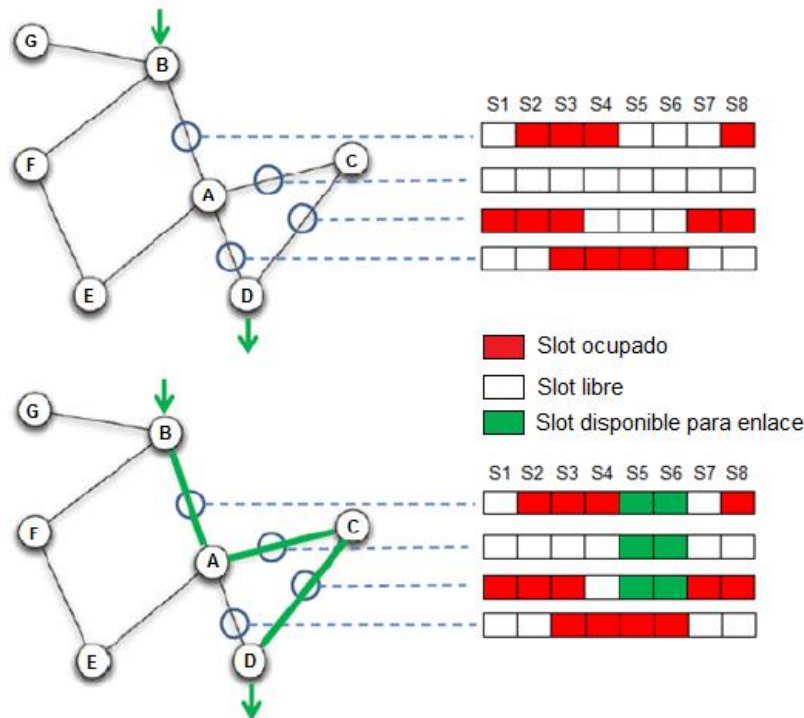


Figura 3.8 Establecimiento de una conexión óptica elástica. Adaptada de [72].

3.2.2 Esquema de Asignación de Espectro

Una red óptica basada en FlexGrid, brinda flexibilidad en el ancho de banda que se asigna a cada canal óptico dependiendo de la demanda existente; esto permite administrar de manera eficiente los recursos espectrales [73].

Generalmente, se realiza asignación del espectro cada periodo de tiempo dependiendo de la demanda, pero en la mayoría de los casos la asignación del espectro se mantiene durante todo el tiempo en el que el canal fue asignado [73]. A continuación se ilustran tres esquemas de asignación de espectro:

3.2.2.1 Asignación de Espectro Fijo en el tiempo

El esquema de Asignación de Espectro Fijo (FSA, Fixed Spectrum Assignment), que se describe en la Figura 3.8, muestra un claro ejemplo cuando el concepto de elasticidad en el tiempo no es permitido [74]. De esta manera, cuando se trabaja bajo esta metodología la frecuencia central y el ancho de banda permanecen estáticos. Por lo tanto, cuando exista demanda de recursos estos podrán usar parte o todo el espectro asignado en un periodo de tiempo pero nunca compartir el espectro con otros canales o demandas [73].

Cuando se desean comparar los requerimientos de ancho de banda relacionado a cierta demanda con la capacidad del canal asignado para la operación, se encuentran dos escenarios:

- Dado un canal con cierto ancho de banda donde su capacidad no es totalmente ocupada porque la demanda de ancho de banda es menor, se desperdicia parte del

espectro que podría ser utilizado por otro canal u otra demanda [74]. En la figura 3.8 sección a) se muestra como el ancho de banda requerido en el tiempo t es igual a la capacidad de canal asignado pero el espectro utilizado es menor.

- Dado un ancho de banda requerido por una demanda y siendo mayor a la capacidad del canal asignado, se determina que la solicitud no puede ser atendida [74]. La figura 3.8 sección b) muestra como una demanda puede ser atendida cuando ocupa la totalidad del espectro disponible y en el caso (t') como se excede la capacidad del ancho de banda del canal y por ende la demanda es rechazada.

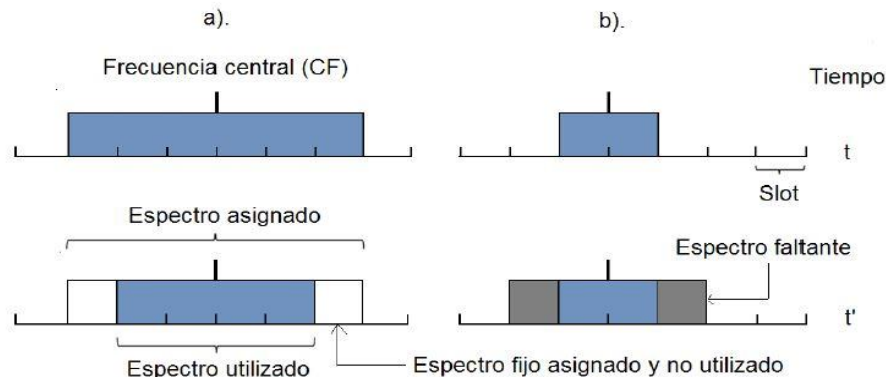


Figura 3.9 Esquema de asignación de espectro fijo. Tomada de [17].

3.2.2.2 Asignación de Espectro Semi-Elástico en el tiempo.

Cuando se hace referencia al esquema fijo (FSA), relacionando la Asignación de Espectro Semi-Elástico (SSA, Semi-Elastic Spectrum Assignment) se menciona la frecuencia central (CF) que permanece fija en el tiempo, pero el ancho de banda asignado, no necesariamente. Para este esquema los slots que se encuentran en el borde de los canales son compartidos entre los dos canales contiguos y se asignan a uno u otro dependiendo de la demanda existente en un determinado instante de tiempo. En este esquema se pueden apreciar dos escenarios:

- Cuando la demanda aumenta el ancho de banda requerido, nuevos slots contiguos a la CF se asignan si se cumplen ciertas condiciones de continuidad y contigüidad del espectro [74]. La figura 3.9 (a) ilustra el escenario anteriormente mencionado.
- Cuando la demanda del ancho de banda se reduce, la capacidad del espectro asignado se reducirá y los slots liberados en los extremos estarán disponibles para conexiones que lo requieran [74]. En la figura 3.9 (b) se ilustra dicho escenario.

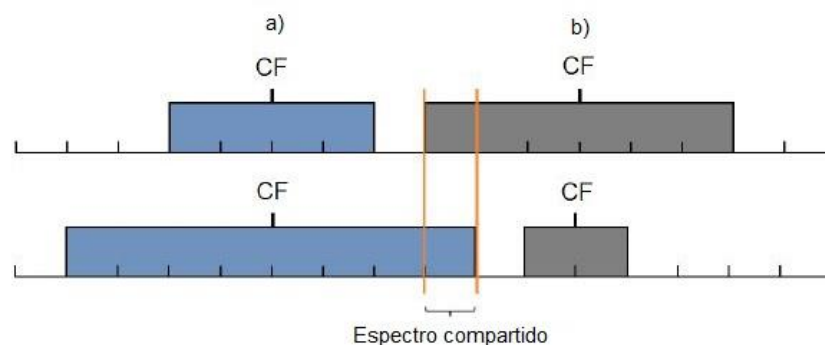


Figura 3.10 Esquema de Asignación de Espectro Semi-Elástico. Adaptada de [17].

3.2.2.3 Asignación de Espectro Elástico en el tiempo.

La Asignación de Espectro Elástico (ESA, *Elastic Spectrum Assignment*), la frecuencia central CF y el ancho espectral (SW) pueden cambiar por cada periodo de tiempo [73]. En la figura 3.10 se puede apreciar dos casos, cuando se utiliza el mismo espectro pero no los mismos slots en un mismo periodo de tiempo.

a. Expansión/Contracción de espectro:

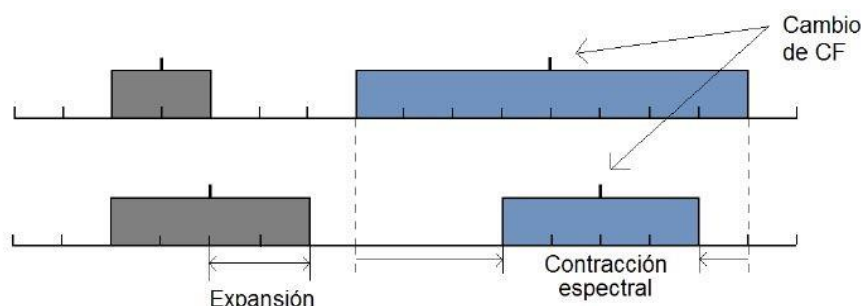


Figura 3.11 Esquema de asignación de espectro elástico con Expansión/Contracción. Tomada de [17].

b. Reasignación del espectro:

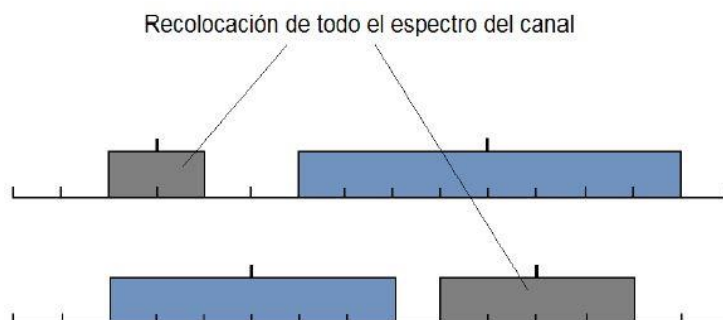


Figura 3.12 Esquema de asignación de espectro elástico con Reasignación. Tomada de [17].

Al presentar los esquemas de asignación del espectro, de forma incremental y sucesiva van aumentando el grado de complejidad y así mismo la flexibilidad permitida. Lo anterior conlleva al aumento en el ahorro de espectro pero implica una alta complejidad en la implementación de los algoritmos que realizan dichas técnicas. En el presente trabajo se opta por la asignación de espectro fijo en el tiempo (sección 3.2.2.1) debido a la facilidad presentada en la implementación.

3.2.3 Algoritmos de Enrutamiento y Asignación de Espectro

Los algoritmos de Enrutamiento y Asignación de Espectro (RSA) se pueden clasificar de la siguiente manera: algoritmos RSA Estáticos (offline) y algoritmos RSA Dinámicos (online)

3.2.3.1 Algoritmos RSA Estáticos

En los algoritmos RSA estáticos (offline), se conocen previamente dos elementos: la topología de red y la demanda de tráfico. El problema de RSA se presenta cuando se quiere solucionar el enrutamiento y asignación de espectro de forma paralela (Joint RSA). Teniendo en cuenta la anterior premisa, la mayor dificultad se presenta cuando el número de condiciones se incrementa, puesto la complejidad del cálculo del camino óptimo por cada petición se incrementa pero se compensa optimizando la asignación de espectro [73]. Para poder reducir la complejidad del problema RSA se plantean dos sub-problemas denominados: enrutamiento y asignación de espectro (R+SA), tomados de forma separada pero secuencial. Sin embargo, esto no garantiza una solución óptima.

En búsqueda de una solución óptima al problema (RSA) se realiza el cálculo mediante programación lineal entera (ILP, *Integer Lineal Programming*); es un método de programación matemático para la solución de problemas complejos y la obtención de soluciones enteras óptimas que se pueden describir como un conjunto de variables donde puede contener una o varias funciones objetivo, que pueden ser la maximización o minimización de una variable; en el caso de las redes ópticas elásticas (FlexGrid), las funciones pueden variar así: maximizar el número de slots de frecuencia consecutivos que se dejan libres después de una petición, minimizar los saltos de una ruta o reducir la posición en el espectro del último slot de frecuencia asignado a una petición [73].

En general, en la literatura se encuentran diferentes algoritmos heurísticos mediante los cuales se busca dar solución a los problemas de RSA, donde se implementan operaciones de manera simultánea o secuencial, puesto que dichos algoritmos son de complejidad reducida en términos computacionales que los que se presentan en la sección previa.

3.2.3.2 Algoritmos RSA Dinámicos

En los algoritmos RSA online se propone el grado de fragmentación disponible (AFD, *Available Fragment Degree*) y la continuidad del espectro entre enlaces (CSL, *Continuity of Spectrum among Links*). El objetivo de los algoritmos es tratar que la red acepte más demandas con la condición de mantener un estado óptimo, escogiendo la ruta y la posición asignada del espectro en la luz del paso conjunto. En orden para simplificar la expresión de los algoritmos, el concepto del canal es introducido. --- El problema abordado de RSA como la resolución de enrutamiento y la asignación de espectro de manera conjunta (Joint RSA). Con el mismo 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 [8]. Para reducir la complejidad, es posible descomponer el problema RSA en dos sub-problemas: enrutamiento y asignación de espectro (RS+A), abordados por separado y de forma secuencial; sin embargo afrontar los dos subproblemas de forma secuencial no garantiza una solución óptima [73].

Cuando existe tráfico aleatorio en las entradas y salidas de cada nodo, y además se observa variación en la demanda de tráfico en el tiempo se plantea un reto mayor [75]. Para solucionar el problema de RSA dinámico los estudios proponen algoritmos heurísticos que requieren menos tiempo de computación [73]. Dichos algoritmos pueden clasificarse en:

Algoritmos de una etapa (One-Step): se resuelven las operaciones de enrutamiento y asignación de espectro de forma paralela [73]. Los siguientes son ejemplos de algoritmos de una etapa:

- Spectrum-Vector Constraint Path Searching Algorithm (SPV): genera un árbol de búsqueda de ruta vectorial (PVST, *Vector Path Searching Tree*), similar a los árboles que se generan por los algoritmos basados en ramificación y unificación. En este árbol, las rutas candidatas se almacenan junto con el espectro agregado y se prueban en cada nivel del árbol. Este algoritmo presenta una escalabilidad limitada por lo que solo es viable para redes con un número limitado de nodos [76].
- K Shortest Paths (KSP): se basa en el conjunto de trayectos más cortos, determinados por la distancia entre nodos (*offline*). Cuando llega una solicitud de conexión, el espectro agregado se determina para cada una de las k rutas designadas entre los nodos en cuestión [76].
- Modified Dijkstra's Shortest Path (MSP): es una modificación del algoritmo de Dijkstra. La modificación se basa en la introducción de la intersección del espectro de los enlaces que pertenecen a las rutas que se eligen y en la comprobación de si hay un ancho de banda disponible para la solicitud entrante. La literatura, comenta sobre la complejidad que puede llegar a alcanzar el algoritmo dependiendo del número de rutas consideradas cuando se requiere establecer un enlace entre dos nodos [76].
- Modified Dijkstra's Shortest Path (MSP2): se presenta como una mejora que funciona de manera similar a MSP pero obtiene resultado más óptimos debido a la reducción de la longitud de la ruta a seguir entre un par de nodos [76].

Algoritmos de dos etapas (Two-Step): cuando se tiene un algoritmo de dos etapas, el problema RSA se descompone en dos sub-problemas, que son resueltos de forma secuencial. Primero la operación de enrutamiento y luego la asignación de espectro [73][77]. En la siguiente sección se explica con detalle.

3.2.3.3 Algoritmos Heurísticos para RSA Estáticos y Dinámicos

Para solucionar el problema RSA la literatura expone varias alternativas tanto para el caso Estático como para el Dinámico, mencionadas previamente en este documento.

En este ítem se prestará mayor atención a los algoritmos RSA de dos etapas (Two-Step). En primer lugar se resuelve el problema de enrutamiento, conocido también como cálculo de ruta que puede ser estático cuando las trayectorias se calculan y se fijan o en su lugar puede ser adaptativo, cuando las trayectorias que se calculan pueden variar en función del estado de la red [75]. En el presente trabajo de grado se utilizará el algoritmo Dijkstra para calcular el camino más corto y posteriormente se utilizará uno de los siguientes algoritmos para la asignación de espectro.

- **First Fit (FF):** esta política asigna un índice a cada slot de frecuencia. Cuando se presenta una solicitud, First Fit trata de seleccionar entre los slots disponibles de la ruta en forma ascendente, el número de slots requeridos y en caso de ausencia del número requerido de slots, la solicitud es rechazada. Las ranuras con índices más altos permanecen disponibles para conexiones futuras. En la literatura se presentan varias políticas de asignación de espectro, pero muchos autores consideran que First

Fit es una de las mejores debido a la baja probabilidad de bloqueo y complejidad computacional [78].

- **Exact Fit (EF):** esta política trata de seleccionar desde los slots disponibles para la ruta, el bloque de slots adyacentes cuyo tamaño sea igual al número de slots requeridos para las solicitudes que llegan. Cuando se ha encontrado el bloque los slots son ocupados y en caso contrario se aplica la política First Fit [79].
- **First Last Fit (FLF):** en esta política de asignación de espectro, todos los slots de espectro en los enlaces de red se dividen en dos particiones. Esto permite divisiones de espectro más pequeños y por lo tanto mayores conexiones en las dos diferentes particiones. Para la asignación de espectro en las particiones, en la primera se aplica First Fit en orden ascendente mientras que en la segunda se realiza la misma política pero en orden descendente; es decir del slot más alto al más bajo. En el caso de un conjunto de solicitudes de espectro, se divide dicho espectro en dos grupos equilibrados. Sin embargo el problema de ésta política es mezclar conexiones con diferentes slots en cada partición [70].
- **Least Used (LU):** asigna un espectro a un camino de luz a partir de una lista de intervalos de espectro disponibles que han sido utilizados por el menor número de enlaces de fibra en la red. Cuando varias ranuras de espectro disponibles comparten el mismo uso mínimo, se utiliza First Fit para seleccionar el mejor slot. Ésta solución busca distribuir de forma uniforme la carga en todos los slots del espectro [80].
- **Most Used (MU):** se usa para asignar un espectro a un camino óptico de la lista de slots de espectro disponibles que se han utilizado en el número máximo de enlaces de fibra en toda la red. De manera similar a Least Fit, si varios slots de espectro disponibles comparten el mismo uso máximo, se usa First Fit para resolver el empate. Con esta solución se intenta proporcionar la máxima reutilización del espectro de la red [80].
- **Last Fit (LF):** se asigna un espectro a un camino de luz de la lista de slots de espectro disponibles que se han utilizado en el número mínimo de enlaces de fibra en toda la red. Si varios slots de espectro disponibles comparten los mismos usos mínimos, se usa First Fit para seleccionar el mejor slot de espectro entre todos los slots de espectro disponibles. De esta manera se intenta distribuir la carga de manera uniforme entre todos los slots del espectro [81].
- **Random Fit (RF):** ésta política mantiene una lista de slots de espectro disponibles. Cuando existe una solicitud de conexión de red, se selecciona aleatoriamente de la lista de slots disponibles y se asigna a la trayectoria de luz utilizada para atender la solicitud. Los slots ocupados son eliminados de la lista de slots disponibles y cuando la solicitud es completada, es decir finalizada, la lista de slots disponibles se vuelve a actualizar. Una de las ventajas de utilizar esta política de asignación de espectro, es que se puede reducir la posibilidad de seleccionar los mismos slots para conexiones múltiples cuando la asignación del espectro se realiza de forma distribuida [80].

- **Lowest Starting Slot (LSS):** ésta política asigna la primera secuencia de slots disponibles que cumplan con los requisitos de nuestro canal [73].
- **Void Filling (VF):** selecciona la ruta con el menor número de slots libres consecutivos y de esta manera disminuir la fragmentación en el espectro en el mayor grado posible [73].

Tabla 3.1 Presentación de los algoritmos encontrados. Adaptada de [73].

Algorithms	ILP	Heuristic	
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 (LSS)
			KSP + Most Subcarriers First (MSF)
			KSP + First Fit (FF)

3.3 RWA - ENRUTAMIENTO Y ASIGNACIÓN DE LONGITUD DE ONDA EN REDES OPS/WDM

Como se ha mencionado previamente, las redes de telecomunicaciones ópticas realizan enrutamiento (routing) y asignación de recursos espectrales. En este caso se realiza la asignación de longitud de onda (*Wavelength Assignment*). De la misma manera que en RSA la unión de los anteriores se denomina enrutamiento y asignación de longitud de onda (RWA, *Routing and Wavelength Assignment*) y dicho problema también se puede abordar en dos pasos. El primero de forma simultánea con alto consumo de recursos computacionales debido a la complejidad de los algoritmos (RWA) o de forma consecutiva (R + WA) con menor consumo de recursos computacionales. La diferencia entre RWA y RSA radica en el concepto que aplica RWA ya que utiliza longitudes de onda continua para asignar recursos mientras que RSA utiliza un número continuo de intervalos para cada conexión óptica [70].

3.3.1 Algoritmos de Enrutamiento y Asignación de Longitud de Onda

Un algoritmo RWA pretende alcanzar el mejor funcionamiento de la red teniendo en cuenta los factores limitantes de la red (número de fibras, capacidad de la red, etc). RWA se puede clasificar en: RWA Estático donde los requerimientos de tráfico son conocidos antes de iniciar el proceso, es decir “Offline” y RWA Dinámico cuando las peticiones de conexiones llegan de manera aleatoria, es decir “Online”. El problema RWA Estático se manifiesta cuando se realiza el diseño para la construcción de la red, mientras que RWA Dinámico cuando la red está en marcha.

3.3.2.1 Algoritmos de Enrutamiento

A lo largo de la literatura se pueden encontrar tres tipos de algoritmos que buscan dar solución al enrutamiento en redes que operan sobre WDM: enrutamiento fijo, enrutamiento fijo alternado y enrutamiento adaptativo.

- **Enrutamiento fijo:** esta técnica de enrutamiento busca elegir la ruta más directa entre los nodos. Al fijar el enrutamiento de forma estática se disminuyen los tiempos de

establecimiento de conexión pero se obtiene mayor probabilidad de bloqueo. Las técnicas más utilizadas en este tipo de algoritmos son: algoritmo de camino más corto (SP, *Shortest Path*), que busca consumir el menor número de recursos; algoritmo de peso por salto (HW, *Hop Weight*), que intenta disminuir la probabilidad de bloqueo; algoritmo de la menor distancia (DW, *Distance Weight*), que logra una reducción en los retardos puesto que elige la ruta con menor distancia.

- **Enrutamiento adaptativo:** esta técnica se realiza en tiempo real, es decir, cuando se establece y se termina una conexión la información sobre la red se actualiza; de esta manera se disminuye la probabilidad de bloqueo de la red. Entre los algoritmos más destacados en esta técnica se encuentran: longitudes de onda disponibles (AW, *Available Wavelengths*), saltos y longitudes de onda disponibles (HAW, *Hop and Available Wavelengths*), número de saltos 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*).

A continuación se observa una tabla comparativa sobre los algoritmos previamente mencionados.

Tabla 3.2 Comparación de algoritmos de enrutamiento adaptativo. Adaptada de [17].

Algoritmo	Beneficio	Método aplicado	Enrutamiento	
			Fijo	Adaptativo
"Shortest Path", SP	Consumo de recursos.	Reducción del peso total del camino.	X	
"Hop Weight", HW	Probabilidad de bloqueo.	Ruta con mínimo número de saltos.	X	
"Distance Weight", DW	Retardo.	Ruta con mínima distancia en microsegundos.	X	
"Available Wavelengths", AW	Probabilidad de bloqueo.	Ruta con mayor número de longitudes de onda disponibles.		X
"Hop and Available Wavelengths", HAW	Probabilidad de bloqueo.	Ruta determinada por número de saltos y longitudes de onda disponibles.		X
"Total and Available Wavelengths", TAW	Probabilidad de bloqueo.	Ruta determinada por el estado de la red, longitudes de		X

		onda disponibles y totales.		
“Hop Count and Total Wavelengths and Available Wavelengths”, HTAW	Probabilidad de bloqueo.	Ruta determinada por el número de saltos, el estado de la red, y las longitudes de onda disponibles y totales.		X
“Modified Future Cost”, MFC	Probabilidad de bloqueo.	Ruta determinada por Emplea una función de peso combinado de distancia y carga de enlace.		X
“Least Congested Path Routing”, LCPR	Equilibrado de carga.	Ruta de mínima congestión.		X
“Weight Least Congested Path Routing”, WLCPR	Equilibrado de carga. Configuración de parámetros adicionales	Ruta de mínima congestión con pesos.		X
“Load Balance RWA”, LBRWA	Equilibrado de carga.	Equilibrio de carga de los enlaces.		X

3.3.1.2 Algoritmos de Asignación de Longitud de Onda

Para la asignación de longitud de onda se debe cumplir la restricción de continuidad, es decir, se debe usar la misma longitud de onda en todos los enlaces de ruta seleccionada.

La asignación de longitud de onda se puede realizar de forma paralela al enrutamiento. Las técnicas que se utilizan para la asignación de longitud de onda se pueden clasificar en tres: utilizando las más recientes, de forma aleatoria o realizando expansión o contracción del espectro de las longitudes de onda que han sido usadas en los enlaces. Entre los algoritmos para la asignación de longitud de onda se encuentran: 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 (MΣ, *Max Sum*), Reserva de Longitudes de Onda (WR, *Wavelength Reservation*), Protección umbral (TP, *Threshold Protection*), entre otros [82]. En las redes que operan bajo WDM se destacan los siguientes algoritmos de asignación de longitud de onda:

- **Método aleatorio (*Random*):** realiza una búsqueda entre las longitudes de onda disponibles en la ruta seleccionada previamente y elige una de ellas de forma aleatoria.



- **Método de primer ajuste (FF):** las longitudes de onda existentes se enumeran y el algoritmo toma la primera disponible en forma ascendente cuando se requiera establecer un enlace.
- **Método del menos usado (LU):** con el objetivo de realizar balance de carga en la red, este algoritmo selecciona la longitud de onda que presente menor uso.
- **Método del más usado (MU):** selecciona la longitud de onda con mayor uso en la red, para lograr el mayor reuso posible. Éste algoritmo presenta mejor desempeño que los métodos “menos usado” y “primer ajuste” [83].

CAPÍTULO 4. MODELOS DE SIMULACIÓN

4.1 METODOLOGÍA DEL TRABAJO DE GRADO

A continuación se presenta la Figura 4.1, donde se especifica el método empleado para analizar comparativamente el desempeño de las dos redes (modelos de simulación) después de la simulación de los dos modelos.

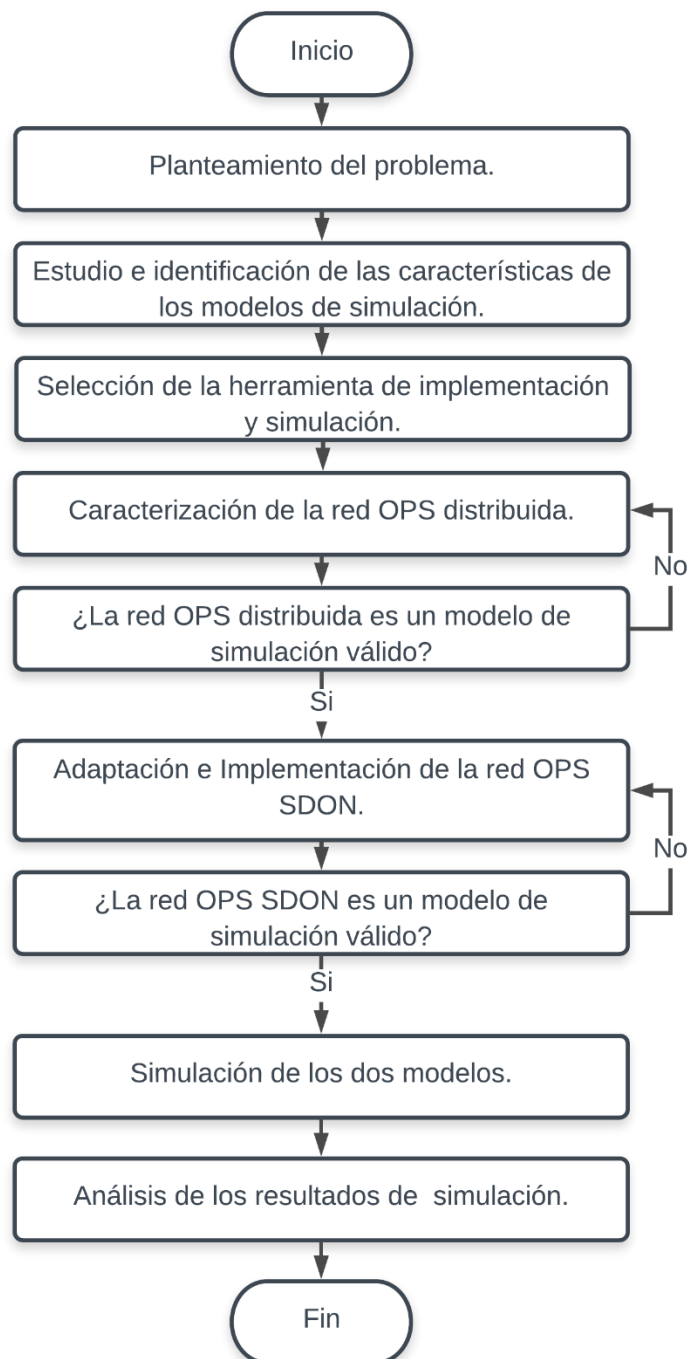


Figura 4.1 Metodología del trabajo del grado. Adaptada de [17].

En la Figura 4.1 se inicia el proceso de análisis comparativo con el planteamiento del problema, seguido del estudio e identificación de las características de los modelos de

simulación. Con estos dos pasos cumplidos, se pasa a seleccionar la herramienta en la cual se pueda hacer una mejor implementación y simulación. En el paso siguiente se caracteriza la red OPS distribuida a partir de una red OBS implementada en una topología NSFNet. Al tener un modelo válido de red OPS distribuida, se pasa a adaptar los módulos de esta red en una red OPS SDON. Hecha esta adaptación se implementa la OPS SDON y teniendo un modelo válido de esta red, se simula cada red con su respectiva configuración y posteriormente se analizan comparativamente los parámetros de desempeño. Así, se da por cumplido el análisis de los resultados de simulación.

4.2 SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE IMPLEMENTACIÓN Y SIMULACIÓN

Para la etapa de diseño e implementación se necesita una herramienta que pueda simular el comportamiento de una red OPS distribuida con enlaces RSA sobre una topología NSFNet, y que permita la implementación de una red OPS SDON. Así, se podrá analizar comparativamente el desempeño de las redes en términos de probabilidad de bloqueo, retardo u otros que afecten el desempeño de este tipo de redes.

A continuación se presenta un análisis de las herramientas (Software) más usadas en la implementación y simulación de estas redes de telecomunicaciones:

4.2.1 J-SIM

Esta herramienta de simulación fue desarrollada en Java con soporte a cualquier sistema operativo con Java SDK 1.5 o superior, por un trabajo colaborativo entre la Universidad de Illinois y la Universidad Estatal de Ohio. El software soporta redes jerárquicas de profundidad arbitraria a partir de una red conmutada de paquetes que contiene una estructura genérica de un nodo y sus componentes; estos pueden ser usados como clase base para describir e implementar nuevos protocolos en la capa de deseada. La interfaz de J-SIM permite la integración con diferentes lenguajes de escritura como Tcl¹⁵ para crear de manera más fácil los escenarios de simulación que configuran y controlan las simulaciones. Sin embargo, aunque no posee herramientas para la visualización de la red simulada es posible utilizar el animador de red de NS-2 [84].

4.2.2 NS-2 (*Network simulator 2*)

Esta herramienta de licencia libre es de gran uso para la implementación de proyectos de simulación, ya que sus posibilidades de uso, sus características y disponibilidad al público permiten que numerosos usuarios realicen distintos trabajos sobre ella. Adicionalmente esta herramienta es de código abierto y una de las más confiables para la implementación. NS-2 permite la simulación de diferentes sistemas a partir de la creación de módulos y de nuevos protocolos. Las simulaciones de NS-2 se basan en lenguaje C++ orientado a objetos y se caracterizan por su elevado nivel de aprendizaje. Las desventajas de NS-2 son el uso de scripts en la implementación y el bajo nivel de características gráficas [85][86].

¹⁵ Tcl: *Tool Command Language*. Lenguaje de Herramientas de Comando. Lenguaje utilizado para el desarrollo rápido de prototipos, aplicaciones, interfaces gráficas y pruebas.

4.2.3 NS-3 (*Network Simulator 3*)

Esta herramienta basa su funcionamiento en las capas de enlace y transporte (OSI), es de uso educativo y permite simular eventos discretos de código abierto. NS-3 presenta una gran desventaja en la programación debido a que hace uso del lenguaje C++ sin orientación a objetos, pero cuenta con una buena interfaz gráfica y permite simular algoritmos de enrutamiento y tecnologías como IPv4, IPv6, WiFi, Wimax, entre otras [85].

4.2.4 NCTUNS

Esta herramienta es de gran uso a nivel investigativo y se encuentra bastante documentación sobre ella. Se considera como una de las mejores herramientas de simulación de redes de comunicaciones ya que presenta una alta fiabilidad, pero presenta una gran limitación en su implementación debido a que solo es posible en Linux y su uso (en las últimas versiones) no es gratuito. NCTUNS presenta un alto potencial ya que permite simular fácilmente a partir de una interfaz gráfica con muy buenas características. Se debe tener un gran conocimiento en distintas tecnologías de red, ya que NCTUNS se basa en las redes de comunicaciones móviles [85].

4.2.5 OPNET (RIVERBED)

Esta herramienta posee una interfaz gráfica de alto nivel, con gran facilidad en su uso ya que posee librerías de modelos que logran una fácil adaptación entre en usuario y los niveles en los que se simula; debido a esto, es ampliamente utilizado a nivel académico. OPNET permite la conexión de diferentes nodos de una red que a su vez se componen de módulos y distintas conexiones programadas en lenguaje C++ [85][87]. Aunque se considera una buena herramienta de simulación, para su uso se debe contar con gran conocimiento en redes, una gran capacidad para programar en C++ y contar con una licencia comercial.

4.2.6 OMNeT++

Esta herramienta permite la simulación de eventos de eventos discretos y es ampliamente usada en el ámbito investigativo y académico. Permite su uso en sistemas como Windows, Unix, MAC, entre otros. OMNeT++ está conformado por módulos, que se comunican por medio de mensajes. Los módulos son compuestos y se componen de módulos simples, y se conectan a través de distintos puertos. Estos módulos basan su programación en lenguaje C++ orientado a objetos. Parámetros como la velocidad de datos, tasa de error de bit y la tasa de paquetes de paquetes perdidos se presentan en los enlaces físicos modelados a partir de las conexiones entre módulos simples y compuestos [85][88].

OMNeT++ es un entorno de desarrollo integrado, que cuenta con una fuerte interfaz gráfica de usuario, y que permite la simulación de cualquier tipo de red basada en componentes modulares. Se ha hecho uso de esta herramienta en diferentes redes basadas en colas de espera, redes ópticas, redes de tecnologías inalámbricas, redes de tecnologías móviles, redes ATM, Redes basadas en TCP/IP, entre otras [85].

Se hace uso del lenguaje NED para diseñar y modelar la topología de red deseada. Una gran ventaja de OMNeT++ es que los niveles de jerarquía dentro de una implementación no tienen

límite. La interfaz gráfica de usuario es superior a la de otras herramientas y su simulación es totalmente flexible con respecto a la inspección en vivo de los datos, el cambio de variables y valores de estas, la forma físico de los nodos y los resultados [88].

4.2.7 Comparación de las herramientas de implementación y simulación

A continuación se presenta la Tabla 4.1, donde se comparan las herramientas de implementación y simulación anteriormente descritas (secciones 4.2.1 - 4.2.5):

Tabla 4.1 Comparación de las herramientas de implementación y simulación [21][85].

Característica	Herramienta	J-SIM	NS-2	NS-3	NCTUNS	OPNET	OMNeT++
Uso en investigación		Medio	Alto	Medio	Alto	Alto	Alto
Licencia del software		No requiere	No requiere	No requiere	Requiere	Requiere	No requiere
Plataforma		Windows, Unix, Mac	Windows, Unix, Mac	Windows, Unix, Mac	Linux	Windows, Unix,	Windows, Unix
Calidad de GUI		Media	Baja	Media	Alta	Alta	Media
Soporte de Tecnologías Niveles de Enlace y Red		Alto	Alto	Medio	Alto	Alto	Alto
Implementación de Heurísticas		No permite	No permite	No permite	No permite	No permite	Permite
Tráfico		Medio	Alto	Medio	Alto	Alto	Medio
Flexibilidad		Media	Baja	Baja	Media	Media	Alta

A partir de las características de las diferentes herramientas de simulación y su respectiva comparación en la Tabla 4.1, se escoge la herramienta OMNeT++ en su versión 4.6 para simular el comportamiento de una red OPS Distribuida y una red OPS SDON con enlaces RSA.

Es necesario tener una herramienta que permita graficar los datos obtenidos en las simulaciones de las dos redes, y a su vez comparar el desempeño de estas. Por lo tanto se pasa a describir las mejores herramientas que permiten graficar a partir de unos datos:

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 [17].

ORIGIN PRO: es un software científico utilizado ampliamente en el ámbito académico para realizar gráficas de alta calidad. Este software cuenta 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 [17].

Ante la descripción de estas dos herramientas para graficar se escoge ORIGIN PRO en su versión 8, debido a que las gráficas obtenidas en esta herramienta son de gran calidad (con diferentes maneras de presentación) y su uso es sencillo.

4.3 IMPLEMENTACIÓN Y ADAPTACIÓN DE LOS MÓDULOS DE LAS REDES OPS

4.3.1 Red OPS Distribuida

Con el objetivo de implementar una red que cumpla con características de OPS distribuida, se inicia con la creación de módulos simples. Dichos módulos se agrupan y conectan hasta conformar los nodos centrales (*CoreNode*) y nodos de frontera (*EdgeNode*).

4.3.1.1 Nodo fuente-destino

El nodo fuente (*source*) se encarga de generar los paquetes que serán transmitidos por la red. Éste módulo cuenta con los siguientes parámetros: dirección de origen, dirección de destino, tamaño de los paquetes (en bytes) y el tiempo entre la generación de paquetes (en segundos). Cuando se crea un paquete el módulo asigna la dirección de destino y la información que llevará por medio de una distribución de probabilidad uniforme. Los parámetros restantes son declarados en el archivo .ned del módulo que pueden ser asignadas en el archivo de configuración omnet.ini del proyecto en OMNeT++.

El nodo de destino (*sink*) se encarga de recibir los paquetes de la red óptica y realizar procesos estadísticos como el cálculo de retardo extremo a extremo y el número de paquetes perdidos.

Los módulos previamente mencionados se agrupan en uno de mayor jerarquía llamado SourceSink como se observa en la Figura 4.2.

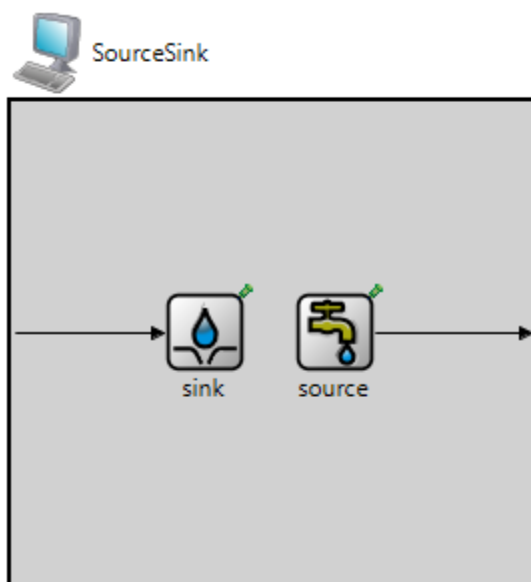


Figura 4.2 Módulo Fuente/Destino en OMNeT++

4.3.1.2 Nodo Frontera (*Edge Node*)

El nodo de borde o frontera de una red OPS se encarga de remitir y recepcionar los paquetes. El nodo de frontera puede actuar como nodo de ingreso o egreso. El nodo de ingreso llamado ensamblador (*Packager*) se encarga de recibir los paquetes provenientes de la fuente o redes

externas (Source), clasificarlos y enviarlos. Paralelamente el nodo de egreso llamado desensamblador (*Unpacker*) se encarga de la recepción y la entrega de los paquetes al destino. En la Figura 4.3 se muestra el esquema (.ned) de los nodos mencionados anteriormente en OMNeT++.

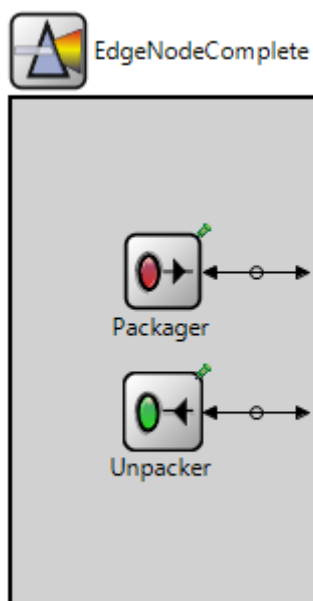


Figura 4.3 Nodo Frontera de ingreso y egreso.

4.3.1.2.1 Nodo Frontera de Ingreso (*Packager*)

El nodo frontera de ingreso contiene un módulo (en .ned) compuesto llamado *Packager* que se encarga de clasificar y enviar los paquetes; éste se compone de tres submódulos: un clasificador (*classifier*), un regulador (*step*) y un planificador de envío (*Sender*), como se muestra en la Figura 4.4.

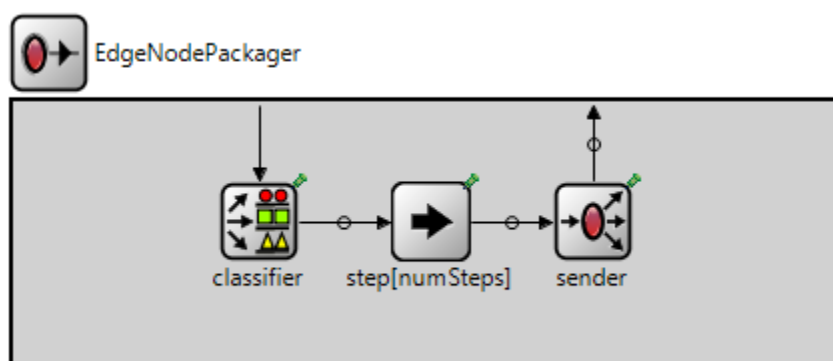


Figura 4.4 Submódulos que conforman el Nodo de Frontera.

El clasificador (*Classifier*) se encarga de recibir los paquetes de datos que llegan desde la fuente (*Source*) y clasificarlos teniendo en cuenta su dirección de destino y el tipo de servicio. Posteriormente se entregan al submódulo regulador (*step*) que agrega atributos adicionales para el control y la estadística del paquete en la red. Luego, se envían al submódulo planificador de envío (*Sender*) que se ocupa de generar un control de paquete (PC), generar el tiempo de offset, realizar la reserva de recursos y planificar el envío del PC y el paquete

hacia el nodo central (*CoreNode*). El paquete de control se rellena con los siguientes parámetros: diferencia entre el tiempo actual y el tiempo estimado de llegada del paquete de datos, dirección de destino, color (canal por el cual es enviado el paquete) y tamaño del paquete actual.

La reserva de recursos del paquete se realiza mediante un algoritmo heurístico basado en LAUC (LAUC adaptado) que busca el canal de datos que se encuentre libre en el menor tiempo. Cuando se tiene el canal de datos disponible para el envío del paquete, se envía el PC por un canal dedicado (corresponde al último canal en todos los casos) y el paquete después de un tiempo de offset.

4.3.1.2.2 Nodo Frontera de Egreso (*Unpacker*)

Se encarga de recibir los paquetes de datos provenientes de otros nodos de la red y entregarlos a su respectivo destino. En este nodo se realizan los cálculos del número de paquetes perdidos y el retardo extremo a extremo de paquetes¹⁶. Para este caso se ha creado el módulo *Unpacker*, el cual se puede observar en la Figura 4.3.

4.3.1.3 Nodo Central (*Core Node*)

Los nodos de núcleo o centrales permiten la conmutación de los paquetes de datos de manera transparente sobre la fibra óptica, al configurar una matriz de conmutación para que cuando un paquete llegue a un conmutador salga por alguna de las interfaces de salida, dependiendo del destino que tenga y el canal de datos sobre el que viaje. 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 de núcleo 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 PC y el paquete de datos; al llegar un PC se envía a la unidad de control, mientras que el paquete se envía al conmutador óptico sin realizar ninguna conversión. El PC es recibido en la unidad de control, se convierte de óptico a eléctrico (OE), se procesa (para configurar el conmutador óptico cuando llegue el paquete), se convierte al dominio óptico y se envía a la interfaz de salida. Finalmente la interfaz de salida envía el PC por el canal dedicado y el paquete por su canal de datos hacia el siguiente nodo.

Adicionalmente en el nodo central se encuentra el módulo de enrutamiento (*routing*) basado en el algoritmo de Dijkstra (explicado en el capítulo 3) que se encarga de brindar la información de enrutamiento para que el conmutador óptico envíe el paquete por el puerto adecuado. De la misma manera, se encuentra el módulo *GatesHorizon* que se encarga de brindar la información de la asignación de recursos. Éste módulo se puede apreciar en la Figura 4.7.

¹⁶ El retardo extremo a extremo de paquetes en el tiempo que estos tardan en ir desde el empaquetador hasta el desempaquetador.

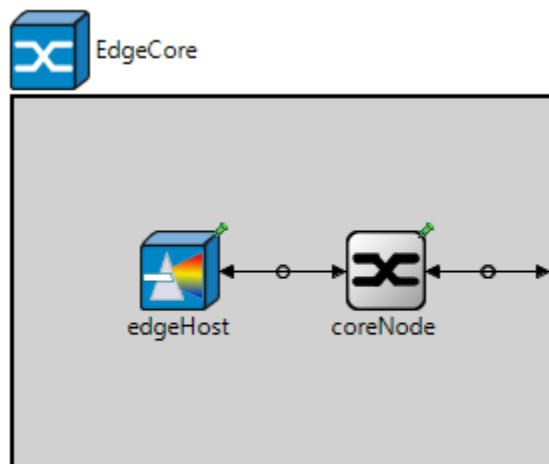


Figura 4.5 Conexión entre el Nodo de Frontera y el Nodo Central de una red OPS.

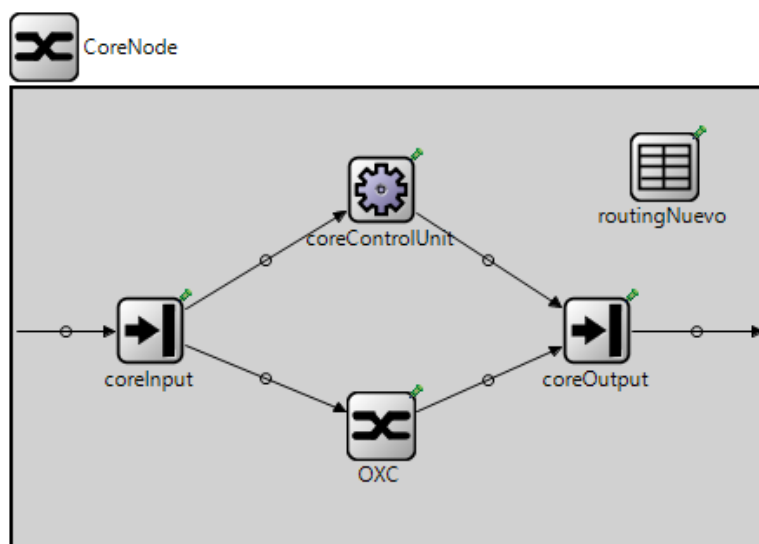


Figura 4.6 Módulos que conforman el Nodo Central.

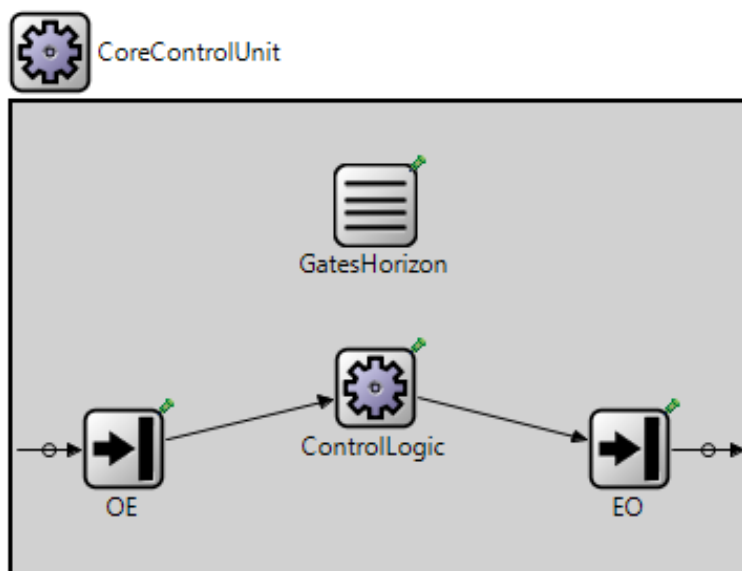


Figura 4.7 Módulos Unidad de Control.

4.3.1.4 Caracterización de la red OPS Distribuida basada en la topología NSFNeT

Al crear cada uno de los nodos básicos de una red OPS como los nodos de frontera y los nodos centrales, se procede a caracterizar la red, en este caso con la topología NSFNeT (*National Science Foundation Network*). NSFNeT es una red WAN que conecta 14 ciudades de los Estados Unidos de América. La Figura 4.8 ilustra la topología de dicha red con sus respectivas distancias físicas entre los nodos. Esta red es de gran importancia ya que es usada ampliamente en el análisis de desempeño de redes en numerosos trabajos de investigación. La red presenta una topología distribuida irregular con número de conexiones variables por nodo [21].

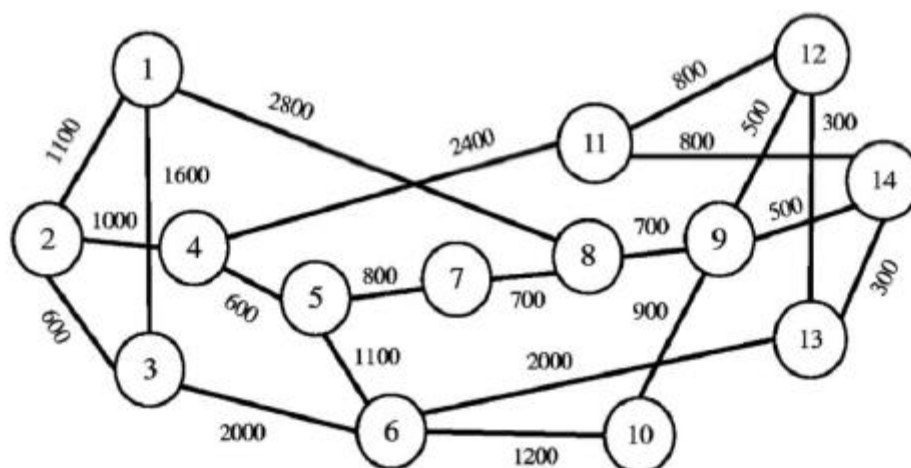


Figura 4.8 Topología NSFNeT. Tomada de [21].

Finalmente la red previamente explicada se modeló en la herramienta de simulación OMNeT++. Los módulos creados, se agrupan en un módulo compuesto (*edgeCore*) y se ubican en el mapa Estados Unidos para formar la topología de la red. La red modelada en OMNeT++ se puede apreciar en la Figura 4.9.

4.3.2 Red OPS SDON

Para realizar la implementación de una red que cumpla con características de OPS SDON, se abstraen las funciones de la red OPS Distribuida (enrutamiento y asignación de recursos) y se adaptan e implementan los siguientes módulos de la red.

4.3.2.1 Nodo Frontera de Ingreso (*Packager*)

En el nodo frontera de ingreso se encuentra el submódulo: planificador de envío (*Sender*); cuando llega un paquete de datos, se encarga de generar un paquete de control PC que viaja hasta un Nodo Centralizado para solicitar enrutamiento y asignación de recursos. El paquete de control se llena con los siguientes parámetros: dirección de origen, dirección de destino, tamaño del paquete y estado¹⁷. El paquete de datos será puesto por un tiempo en cola, a la espera de enrutamiento y asignación de recursos por parte del nodo centralizado. Si pasado cierto tiempo no se recibe respuesta del nodo centralizado, se descarta el paquete.

¹⁷ Parámetro para determinar si el paquete de control ya fue procesado en el nodo centralizado.

4.3.2.2 Nodo Central (Core Node)

El nodo de núcleo o central recibe un parámetro adicional que determina cual nodo está centralizado, de tal manera que al realizar la caracterización de la red OPS SDON se pueda configurar fácilmente desde el archivo omnetpp.ini. En ese orden de ideas, se puede distinguir entre dos tipos de nodo central: el tradicional y el centralizado.

El nodo tradicional se encarga de recibir y/o enviar los paquetes de control, que llegan desde el nodo de frontera o de otro nodo de núcleo. El nodo tradicional revisa el estado del paquete de control; si no está procesado se envía por medio de un canal dedicado hacia el nodo centralizado. Si está procesado pueden ocurrir dos casos: si el paquete de control es para el nodo de frontera asociado a este, se envía un mensaje de control hacia el planificador de envío y a su vez se realiza la programación de la compuerta en el tiempo determinado por el paquete de control. En el segundo caso, si el nodo tradicional no es el destino del paquete de control, se envía por la compuerta indicada hacia su destino.

El nodo centralizado, se encarga de recibir y procesar los paquetes de control que llegan desde los nodos tradicionales o desde el nodo de frontera asociado. En el submódulo de centralización (fcentral) ilustrado en la Figura 4.9 se efectúa el procesamiento para obtener los parámetros del paquete de control, realizar el enrutamiento y asignación de los recursos para atender la solicitud. Una vez terminado el procedimiento, se obtienen nuevos paquetes de control que llevarán la información hasta los nodos implicados (origen, destino y de paso).

Finalmente cabe aclarar que tanto el nodo tradicional como el centralizado, mantienen las funciones de conmutación óptica para aplicar las configuraciones de los paquetes de control, es decir, programar las compuertas para el paso de paquetes.

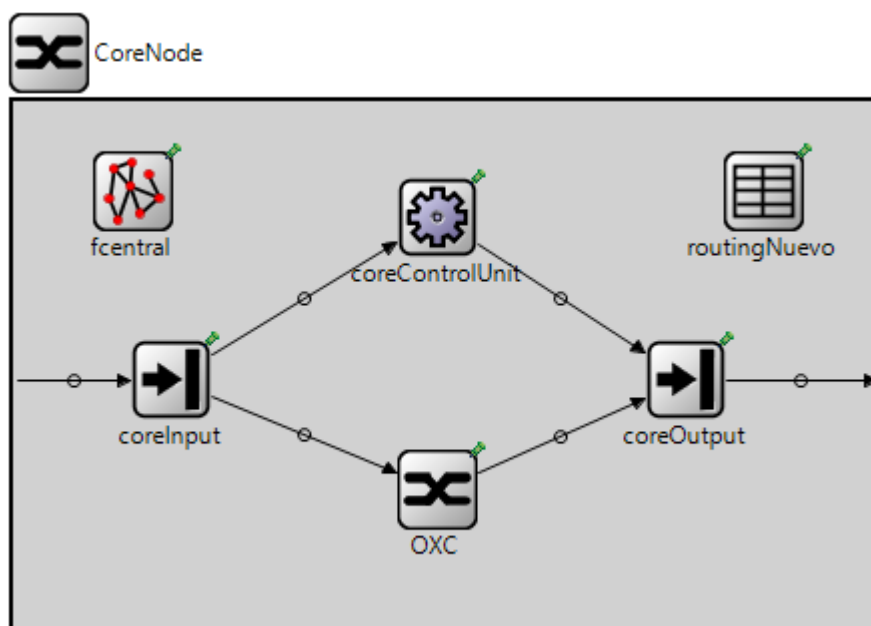


Figura 4.9 Módulos que conforman el Nodo Centralizado.

4.3.2.3 Caracterización de la red OPS SDON basada en la topología NSFNeT

De manera similar a la red OPS Distribuida se procede a crear cada uno de los nodos básicos de una red OPS SDON como los nodos de frontera (adaptado) y los nodos centrales (adaptados). Se elige el nodo a centralizar y se procede a caracterizar la red, en este caso con la topología NSFNeT (*National Science Foundation Network*) en el nodo 9 como se muestra en la Figura 4.10 ya que presenta la mejor distancia promedio al resto de nodos de la topología.

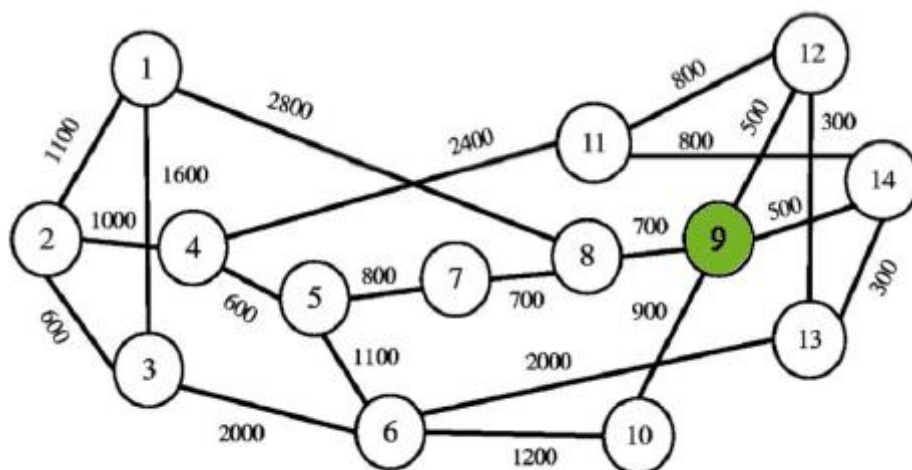


Figura 4.10 Topología NSFNeT con un nodo centralizado.

4.4 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LOS ALGORITMOS RSA SELECCIONADO

En el Capítulo 3 se mencionó que para el problema de enrutamiento de las redes OPS/FlexGrid se implementa el algoritmo de caminos mínimos o algoritmo de Dijkstra, ya que es un algoritmo de baja complejidad, sencillo de implementar y muy reconocido en la literatura. En otro orden de ideas, para el problema de asignación de espectro se implementa un algoritmo heurístico basado en LAUC (LAUC adaptado).

4.4.1 Algoritmo de Dijkstra

El algoritmo de Dijkstra se clasifica dentro de los algoritmos de búsqueda. El objetivo es determinar la ruta más corta desde un nodo origen hasta cualquier punto de la red. La metodología se basa en iteraciones, aumentando la dificultad del proceso a medida que el tamaño de la red aumenta.

El algoritmo de Dijkstra comienza marcando todos los nodos como no utilizados, asignándolos con distancia de valor infinito relativo. Adicionalmente usa etiquetas a partir del nodo de origen y para cada uno de los nodos subsiguientes, que pueden ser de tipo temporal o permanente. Se determina como temporal cuando existe la posibilidad de encontrar un mejor camino y permanente cuando no es posible encontrar un mejor camino, es decir, ya no hay más caminos por verificar. En un comienzo se parte del nodo inicial conocido y se visitan los nodos adyacentes, guardando la información del nodo de origen y el parámetro evaluado (puede ser

costo, distancia, tiempo, etc). De manera iterativa se repite el proceso, tomando el nodo actual como punto intermedio y sustituyendo las etiquetas guardadas, en el caso de encontrar una ruta mejor. Los pasos que sigue el algoritmo de Dijkstra para encontrar el camino más corto entre dos nodos de un grafo¹⁸ según [76]:

Teniendo un grafo dirigido ponderado de **N** nodos no aislados, sea **s** el nodo inicial, un vector **D** de tamaño **N-1** almacenará al final del algoritmo las distancias desde **s** al resto de los nodos [76].

1. Inicializar todas las distancias en **D** con un valor infinito relativo ya que son desconocidas al principio, con la excepción del nodo **s**, que debe iniciarse en 0 debido a que la distancia de **s** a **s** sería 0.
2. Sea **a = s** (se toma como nodo actual).
3. Se recorren todos los nodos adyacentes (denotados **vi**) de **a**, excepto los nodos marcados (aquellos que no son adyacentes).
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, si se cumple que $(D_i > D_a + d(a, v_i))$ entonces $D_i = D_a + d(a, v_i)$.
5. Se determina el nodo **a**, como completo.
6. Ahora, el nuevo nodo actual será el de mayor valor en **D** (almacenando los valores en una cola de prioridad) y se repite el procedimiento desde el paso 3 mientras existan nodos no marcados.
7. Una vez terminado el algoritmo, **D** se encontrará completamente lleno.

El pseudocódigo del algoritmo de Dijkstra se plantea de la siguiente manera según [89]:

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 $v \in \text{adyacencia}[u]$ **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]))

¹⁸ Grafo: estructura matemática que contiene cierto número de nodos y conexiones que dependen del tipo y grado de complejidad del mismo.

La implementación del algoritmo de Dijkstra se realiza en lenguaje de programación C, en la herramienta de simulación IDE OMNeT++ a partir del siguiente diagrama de flujo:

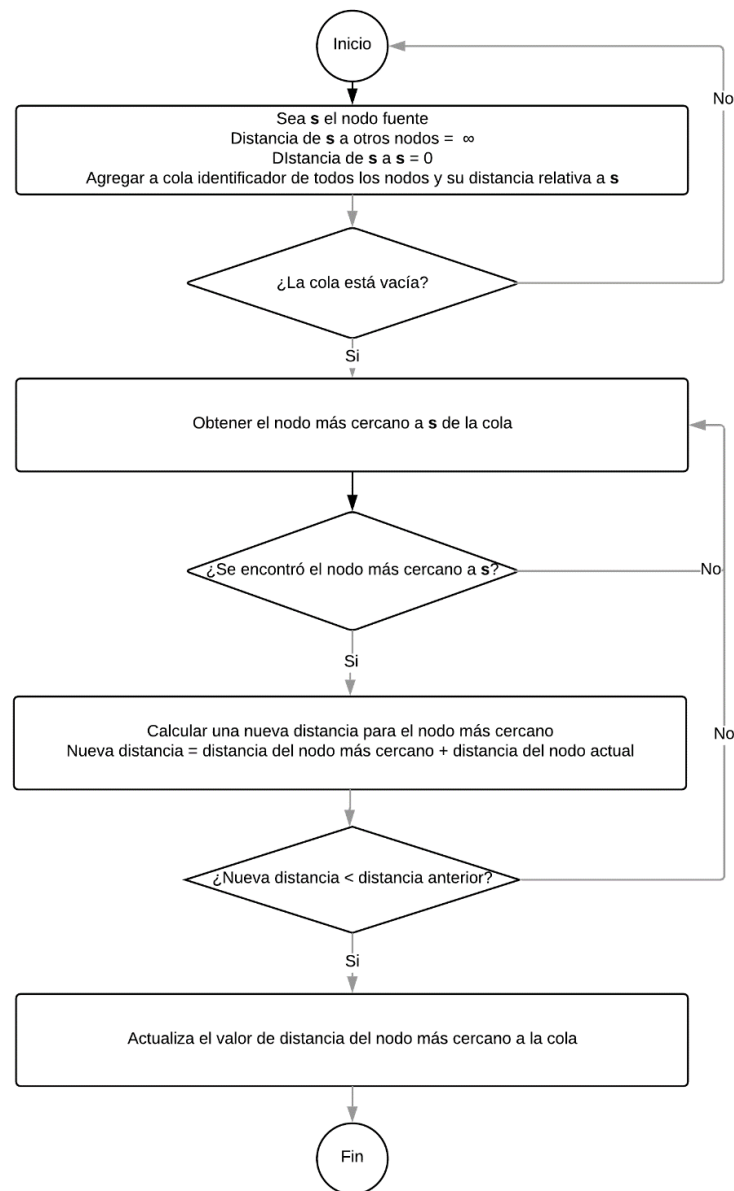


Figura 4.11 Diagrama de Flujo Algoritmo de Dijkstra. Tomado de [17]

4.4.2 Algoritmo LAUC (LAUC Adaptado)

El algoritmo Último Canal Libre Disponible (LAUC) se escoge para realizar el proceso de asignación de recursos en el presente trabajo de grado. Este algoritmo optimiza el uso de recursos, al usar los canales de datos disponibles más recientes para cada paquete de entrada. Al fijarse un tiempo de llegada t de un paquete de datos de duración L , el *scheduler* o planificador, primero encuentra el canal de datos de salida que no tiene planificado nada, en el instante de arribo del paquete. Si algún canal responde al requerimiento anterior, el *scheduler* selecciona el último canal disponible, es decir, aquel canal que presenta un menor hueco entre t y el final del paquete de datos, justo antes de t , para llevar el paquete de datos

que llega. Posteriormente el tiempo sin planificar (tiempo futuro disponible) es actualizado a $t+L$ [89]. El algoritmo LAUC (Adaptado) asigna slots siguiendo los siguientes pasos:

1. Sea horizon un vector que guarda los tiempos próximos en los que los slots estarán disponibles.
2. Se inicializa el vector horizon con ceros.
3. Si llega un paquete de datos, se extrae el slot con el menor tiempo del vector horizon.
4. Se asigna el slot correspondiente a ese tiempo al paquete de datos.
5. Se programa el envío del CP y el paquete.
6. Se actualizan los valores del vector horizon.

En la figura 4.12 se muestra el diagrama de flujo que se toma como base para la implementación del algoritmo LAUC (Adaptado) para la asignación de espectro implementado en el lenguaje de programación C mediante la herramienta de simulación IDE OMNeT++.

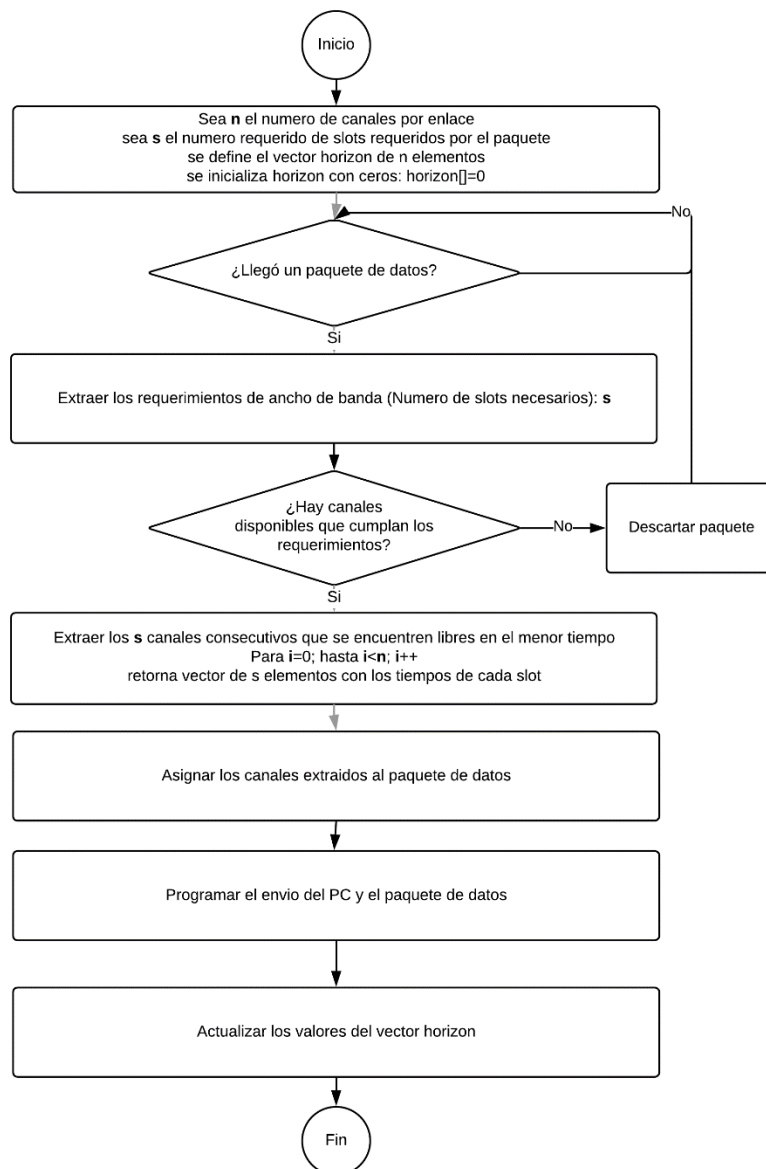


Figura 4.12 Diagrama de Flujo Algoritmo heurístico - LAUC (Adaptado). Tomado de [17]



En este trabajo de grado se referencian tres tipos de servicios: servicio 1, servicio 2 y servicio 3. Cada servicio presenta un requerimiento de ancho de banda diferente que no superan los 50 Ghz (ancho de banda de un canal WDM). Las características de cada servicio son las siguientes:

Servicio 1: demanda un ancho de banda correspondiente a 1 slot de frecuencia (12.5Ghz); capacidad de acceso de 1 y 2.5 Ghz.

Servicio 2: demanda un ancho de banda correspondiente a 2 slot de frecuencia (25 Ghz); capacidad de acceso de 1 y 2.5 Ghz.

Servicio 3: demanda un ancho de banda correspondiente a 3 slot de frecuencia (37.5 Ghz); capacidad de acceso de 1 y 2.5 Ghz.

Finalmente, se aclara que en este trabajo de grado se enfoca en los niveles de capa 2 y 3 del modelo OSI y por lo tanto no se toman en cuenta parámetros como: la potencia del transmisor, sensibilidad del receptor y tipo de fibra.

CAPÍTULO 5: ESCENARIOS DE SIMULACIÓN Y PRUEBAS

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen los escenarios de simulación definidos para el análisis comparativo del desempeño de las redes OPS distribuida y OPS SDON con enlaces RSA sobre una topología NSFNet en términos de la probabilidad de bloqueo, retardo extremo a extremo u otro parámetro que pueda afectar este desempeño.

Se define un escenario de simulación como la configuración principal de los parámetros y características necesarios para la simulación que se va a ejecutar. Se pasa a caracterizar las redes OPS Distribuida y OPS SDON, configuran los parámetros: número de slots, la velocidad de transmisión de los enlaces, el protocolo de señalización, el algoritmo de enrutamiento y el algoritmo heurístico para la asignación de recursos (RSA). A continuación se presenta la Tabla 5.1 con los parámetros nombrados anteriormente.

Tabla 5.1 Escenario de simulación, Casos y Sub casos de simulación.

Escenario: Topología de Red NSFNet			
Casos de Simulación			
Caso 1		Caso 2	
Red OPS Distribuida con enlaces RSA (algoritmo heurístico basado en LAUC) basado en topología NSFNet		Red OPS SDON con enlaces RSA (algoritmo heurístico basado en LAUC) basado en topología NSFNet	
Sub casos de simulación			
Sub caso 1		Sub caso 2	
Espectro disponible de 100 GHz, JET ¹⁹ , Dijkstra (8 slots para OPS Distribuida y 8 slots para OPS SDON)		Espectro disponible de 200 GHz, JET adaptado ²⁰ , Dijkstra (16 slots para OPS Distribuida y 16 slots para OPS SDON)	
Sub caso 1.1	Sub caso 1.2	Sub caso 2.1	Sub caso 2.2
Velocidad de 1.25 Gbps	Velocidad de 2.5 Gbps	Velocidad de 1.25 Gbps	Velocidad de 2.5 Gbps

5.2 CASOS DE SIMULACIÓN

Con el fin de cumplir el cuarto objetivo específico de este trabajo de grado, se plantean dos casos de simulación para analizar el desempeño de las redes OPS Distribuida y OPS SDON con enlaces RSA sobre la topología de red NSFNet. De esa manera, se puede analizar comparativamente el desempeño de las dos redes. En las secciones 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3 se describen el Caso 1, Caso 2, y los Sub casos de simulación respectivamente.

5.2.1 Red OPS Distribuida con enlaces RSA basado en topología NSFNet

El caso 1 es la caracterización de una Red OPS Distribuida en la cual el enrutamiento se implementa mediante el algoritmo Dijkstra y se hace uso del algoritmo heurístico basado en LAUC para la asignación de espectro.

¹⁹ JET: Algoritmo de señalización que permite RSVP de manera unilateral, es decir el nodo de origen envía al próximo nodo el paquete de control y pasado un tiempo offset, el paquete de información. Escogido a partir del estudio de los protocolos de [90].

²⁰ JET adaptado: Algoritmo de señalización adaptado para la red OPS SDON.

5.2.2 Red OPS SDON con enlaces RSA basado en topología NSFNet

El caso 2 es la adaptación de una Red OPS SDON en la cual el enrutamiento se implementa mediante el algoritmo Dijkstra y se hace uso del algoritmo heurístico basado en LAUC para la asignación de espectro.

5.2.3 Sub casos de Simulación

Sub caso 1

En las redes OPS Distribuida y OPS SDON se hace uso del protocolo de reserva de recursos (JET adaptado), del algoritmo Dijkstra para el enrutamiento y del algoritmo heurístico basado en LAUC para la asignación de espectro. En este sub caso las dos redes se han configurado con 8 slots y se cuenta con espaciado entre los canales de 12.5 GHz (De acuerdo a [73], [74], [77]).

Sub caso 2

En las redes OPS Distribuida y OPS SDON se usan los mismos algoritmos del sub caso 1. La diferencia es que para el sub caso 2 el número de slots asciende de 8 a 16 con el fin de analizar la variación del desempeño. Por lo tanto el espectro disponible en el sub caso 2 es de 200 GHz.

Sub casos 1.1, 2.1:

Las redes OPS Distribuida y OPS SDON se configuran con una velocidad de transmisión de 1.25 Gbps en los enlaces.

Sub casos 1.2, 2.2:

Las redes OPS Distribuida y OPS SDON se configuran con una velocidad de transmisión de 2.5 Gbps en los enlaces.

5.3 CONFIGURACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

A continuación se presentan los parámetros de configuración de las redes OPS Distribuida y OPS SDON. Estos parámetros afectan el desempeño y los resultados de las simulaciones. En las tablas 5.2 y 5.3 se presenta dicha configuración para las dos redes:

Tabla 5.2 Configuración de la red OPS Distribuida

Parámetro	Nombre de la variable (OMNeT++)	Intervalo o valor del parámetro
Velocidad de Transmisión	dataRate	1.25 Gbps
		2.5 Gbps
Número de Slots	numSlots	8 slots
		16 slots
Espaciamiento entre canales	NA	12.5 GHz
Espectro Disponible	NA	100 GHz
		200 GHz
Longitud del paquete	packetLenght	1472 Bytes
Tiempo de procesamiento CP	CPProcessing Delay	10 μ s
Tiempo de procesamiento del conmutador óptico	OXCDelay	1 μ s
Tiempo de guarda	guardTime	1 ns
Tiempo offset	minOffset	20 μ s
	maxOffset	0.8 μ s

Tabla 5.3 Configuración de la red OPS SDON

Parámetro	Nombre de la variable (OMNeT++)	Intervalo o valor del parámetro
Velocidad de Transmisión	dataRate	1.25 Gbps
		2.5 Gbps
Número de Slots	numSlots	8 slots
		16 slots
Espaciamiento entre canales	NA	12.5 GHz
Espectro Disponible	NA	100 GHz
		200 GHz
Longitud del paquete	packetLenght	1472 Bytes
Tiempo de procesamiento CP	CPProcessing Delay	10 μ s
Tiempo de procesamiento del conmutador óptico	OXCDelay	1 μ s
Tiempo de guarda	guardTime	1 ns
Tiempo offset	minOffset	20 μ s
	maxOffset	0.8 μ s

Al aplicar la configuración en cada una de las redes, se necesita establecer una densidad de tráfico; esto se hace mediante la variación del parámetro de la función exponencial que fija el tiempo entre la generación de paquetes que en OMNeT++ se denomina *sendIntervalTime*. Este parámetro toma valores entre 2 μ s (Tráfico alto) y 3.7 μ s (Tráfico bajo). Se toman intervalos de 0.1 μ s entre el mismo nivel de tráfico e intervalos de 0.3 μ s entre distinto nivel de tráfico y se establece:

- 2 μ s - 2.1 μ s: Tráfico muy alto
- 2.4 μ s - 2.5 μ s: Tráfico alto
- 2.8 μ s - 2.9 μ s: Tráfico medio
- 3.2 μ s - 3.3 μ s: Tráfico bajo
- 3.6 μ s – 3.7 μ s: Tráfico muy bajo

Se eligen estos valores después de realizar un gran número de pruebas sobre las dos redes y se verifica que en cada valor ninguna de las redes colapse con el fin de tener resultados adecuados para un análisis comparativo correcto.

A continuación se presenta la Tabla 5.4, donde se consignan las especificaciones técnicas de los cuatro equipos utilizados para ejecutar las simulaciones de las dos redes; cabe aclarar que estos equipos deben tener instalada la herramienta elegida en la sección 4.2.6.

Tabla 5.4 Especificaciones técnicas (Hardware).

Equipo	Procesador	Memoria RAM	Disco Duro	Sistema Operativo
DELL OPTIPLEX 7010	Intel Core i7 – 3,4 GHz	8 GB	HDD 1 TB	Windows 10, 64 bits
Lenovo U400	Intel Core i5 – 2,4 GHz	8 GB	HDD 500 GB	Windows 7, 64 bits
Lenovo ThinkCentre	AMD A10 Pro 788 BR7 – 3,5 GHz	8 GB	HDD 500 GB	Windows 10, 64 bits
ASUS X555LN	Intel Core i7 – 2,6 GHz	8 GB	SSD 250 GB	Windows 10, 64 bits

5.4 SIMULACIONES DE LAS REDES

Después de configurar lo especificado en la sección 5.3, se ejecutan las simulaciones en la herramienta IDE OMNeT++ con cada una de las redes según los casos especificados en las secciones 5.1 y 5.2. En total se realizan 160 pruebas de simulación distribuidas así:

- 40 para el sub caso 1.1
- 40 para el sub caso 1.2
- 40 para el sub caso 2.1
- 40 para el sub caso 2.2

Las pruebas de simulación realizadas para un sub caso se ejecutan en un tiempo de simulación de 75ms. Cabe aclarar que este tiempo se escoge porque es el máximo tiempo de simulación al cual llega el nivel de tráfico más alto (2 μ s). A continuación se especifican los niveles de tráfico de la sección 5.3 con su respectivo tiempo de simulación. Aplicando el método de la Tabla 5.5 se realizan 80 pruebas de simulación. Posteriormente se ejecutan simulaciones sobre un tiempo de 2.3 ms variando el nivel de tráfico desde muy alto hasta muy bajo (0.1 μ s – 1 μ s) con intervalos de 0.1 μ s.

Tabla 5.5 Resumen del proceso de simulación.

Tiempo de Simulación [ms]	75	75	75	75	75
Red	Distribuida y SDON	Distribuida y SDON	Distribuida y SDON	Distribuida y SDON	Distribuida y SDON
Nivel de Tráfico	Tráfico muy alto (2 μ s - 2.1 μ s)	Tráfico alto (2.4 μ s - 2.5 μ s)	Tráfico medio (2.8 μ s - 2.9 μ s)	Tráfico bajo (3.2 μ s - 3.3 μ s)	Tráfico muy bajo (3.6 μ s - 3.7 μ s)
Velocidad de los enlaces en Gbps	1.25 y 2.5	1.25 y 2.5	1.25 y 2.5	1.25 y 2.5	1.25 y 2.5

Lo anteriormente expuesto se repite para cada sub caso con los 10 valores de tráfico normalizado (máximo valor 1 Erlang) con velocidades de transmisión en los enlaces de 1.25 Gbps y 2.5 Gbps.

5.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En esta sección se realiza el análisis comparativo de los parámetros de desempeño obtenidos en las pruebas de simulación de las dos redes (OPS Distribuida y OPS SDON) y se presentan los resultados obtenidos.

5.5.1 Simulación caso 1 y 2, sub caso 1

Se aplican las configuraciones necesarias (Tabla 5.1, Tabla 5.2, Tabla 5.3) para las redes OPS Distribuida y OPS SDON en la herramienta IDE OMNeT++. Los casos 1 y 2 corresponden a las redes OPS Distribuida y OPS SDON sobre una topología NSFNet, en las cuales se encuentran implementados los algoritmos de señalización (JET y JET adaptado), enrutamiento (Dijkstra) y asignación de recursos (algoritmo heurístico basado en LAUC). El sub caso1 tiene un espectro disponible de 100 GHz, es decir que se utilizan 8 slots en la red OPS Distribuida y 8 slots en la red OPS SDON, con espaciamentos de canal de 12.5 GHz. Se ejecutan las simulaciones con velocidades de transmisión de 1.25 Gbps y 2.5 Gbps (Sub caso 1.1, 1.2) en un tiempo de simulación de 0.075 s.

A continuación se inicia el análisis comparativo de la Probabilidad de Bloqueo²¹ y el Retardo Extremo a Extremo de los Paquetes entre las dos redes. Cabe aclarar que para las dos redes se ejecutan las simulaciones variando el tráfico como se especifica en las secciones anteriores. El tráfico se normaliza y toma valores desde 0.1 hasta 1 Erlang con intervalos de 0.1 y así tener los 10 valores de tráfico especificados.

²¹ Teóricamente se halla así: Probabilidad de Bloqueo de los paquetes = $\frac{\text{Número de Paquetes Perdidos}}{\text{Número de Paquetes Totales}}$

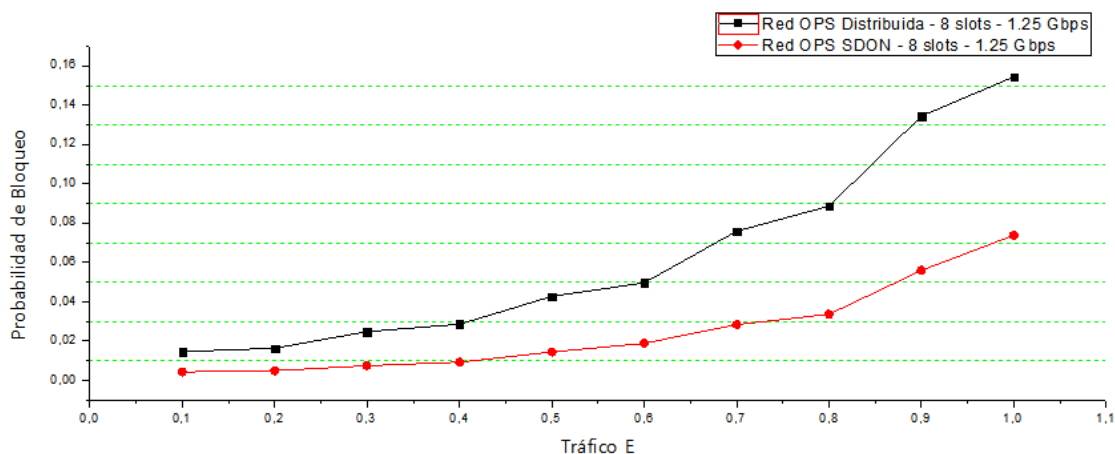


Figura 5.1 Probabilidad de Bloqueo vs Tráfico (E) para 8 slots a 1.25 Gbps.

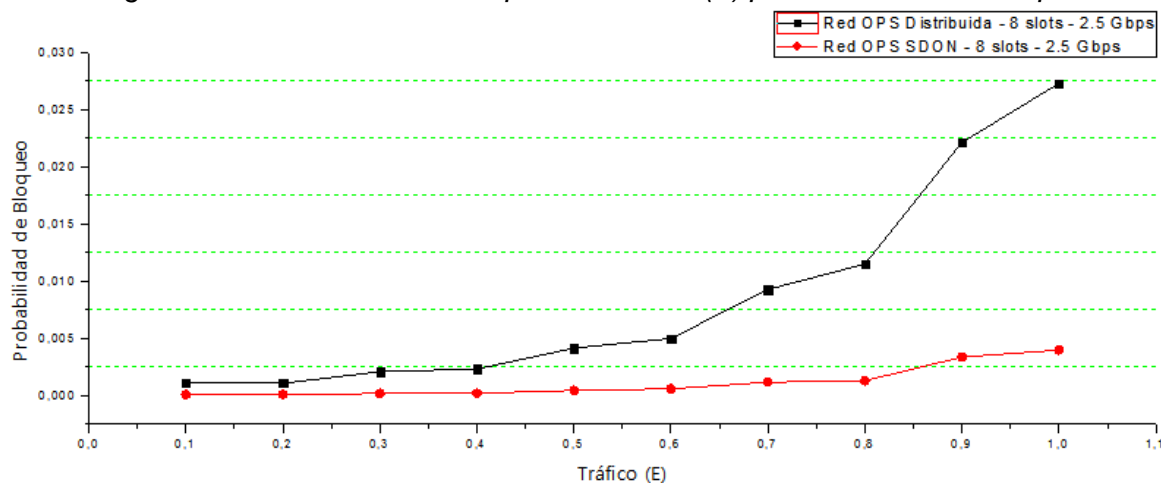


Figura 5.2 Probabilidad de Bloqueo vs Tráfico (E) para 8 slots a 2.5 Gbps.

En las Figuras 5.1 y 5.2 se observa el comportamiento de la probabilidad de bloqueo con respecto al tráfico para velocidades de 1.25 Gbps y 2.5 Gbps respectivamente en una configuración de 8 slots para las dos redes (Distribuida y SDON). Estas Figuras muestran una probabilidad de bloqueo que crece a medida que el tráfico se aumenta en las redes. Esta variación en el tráfico ocasiona el comportamiento anteriormente observado ya que para cada una de las redes la asignación de recursos se torna más difícil a medida que el tráfico va en aumento.

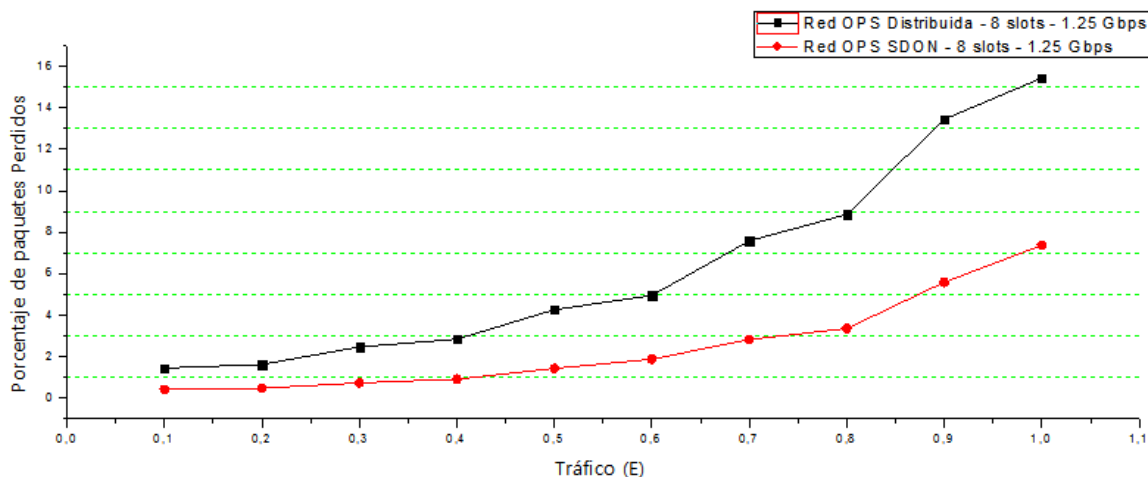


Figura 5.3 Porcentaje de paquetes Perdidos vs Tráfico (E) para 8 slots a 1.25 Gbps.

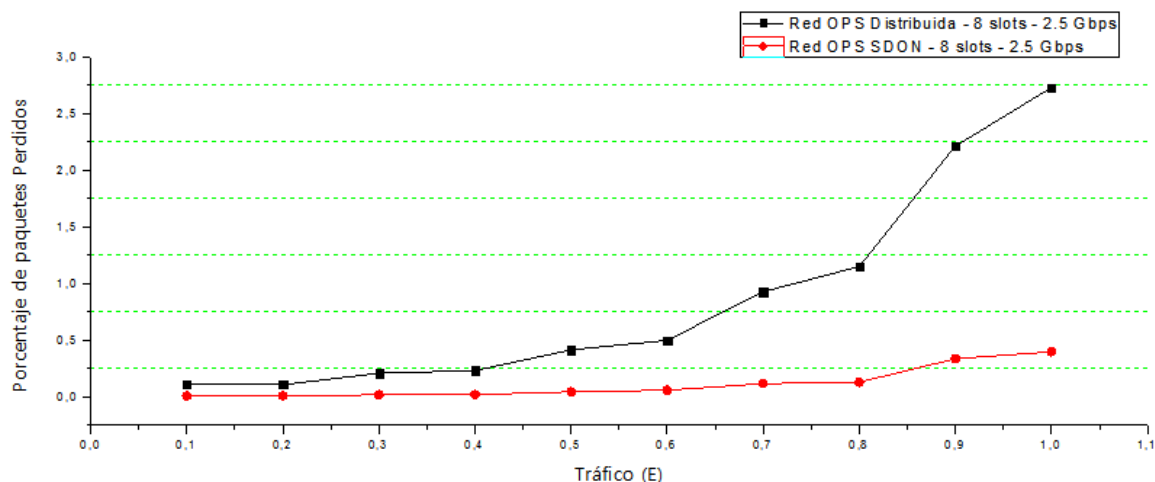


Figura 5.4 Porcentaje de paquetes Perdidos vs Tráfico (E) para 8 slots a 2.5 Gbps.

Las Figuras 5.3 y 5.4 muestran el comportamiento del porcentaje de paquetes perdidos con respecto al aumento del tráfico para velocidades de 1.25 y 2.5 Gbps respectivamente. Al igual que las Figuras 5.1 y 5.2, en las Figuras 5.3 y 5.4 se observa que a medida que aumenta el tráfico, el porcentaje de paquetes perdidos lo hace también. A partir del análisis de las Figuras 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 se observa una respuesta mejor de la red OPS SDON sobre la OPS Distribuida ya que esta red centralizada hace un mejor uso del espectro disponible de 100 GHz (8 slots).

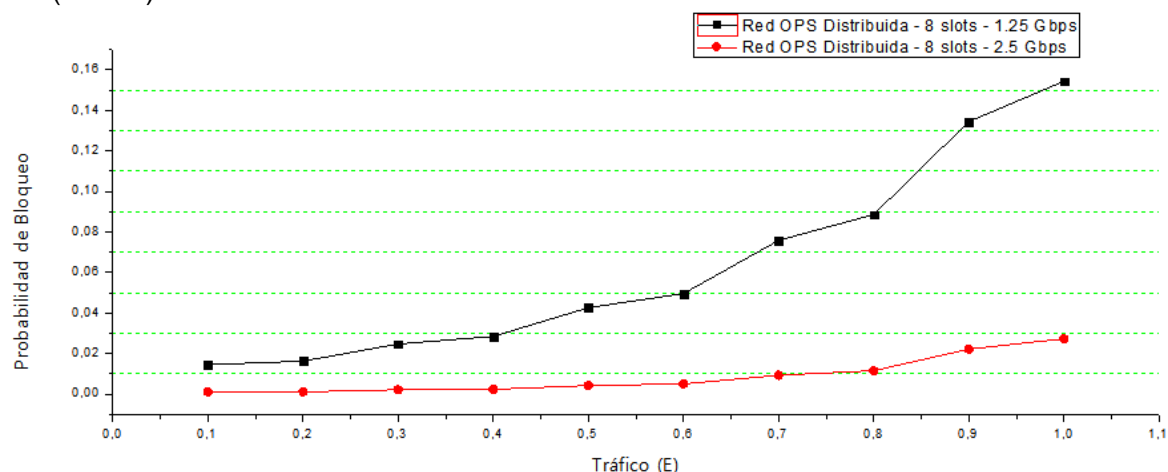


Figura 5.5 Probabilidad de Bloqueo para 8 slots a 1.25 y 2.5 Gbps en OPS Distribuida.

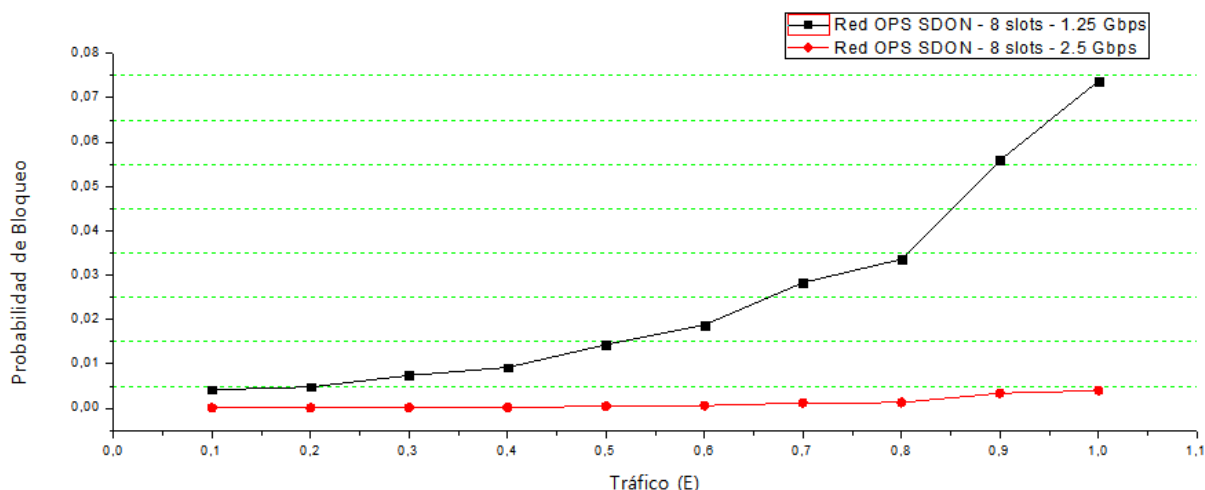


Figura 5.6 Probabilidad de Bloqueo para 8 slots a 1.25 y 2.5 Gbps en OPS SDON.

En las Figuras 5.5 y 5.6 se observa el comportamiento de la probabilidad de bloqueo con respecto al aumento del tráfico en la red OPS Distribuida y la red OPS SDON respectivamente. Estas dos Figuras tienen la peculiaridad de analizar una red diferente cada una con el fin de observar el efecto de varias las velocidades en los enlaces (1.25 Gbps, 2.5 Gbps). A partir de los resultados obtenidos se logran mejores probabilidades de bloqueo cuando se simula cada red con una velocidad de 2.5 Gbps. Así, se logra descongestionar la red y se reduce el número de paquetes perdidos.

A continuación, en las Figuras 5.7 y 5.8 se observa el comportamiento del Retardo Extremo a Extremo con respecto al tráfico en cada red:

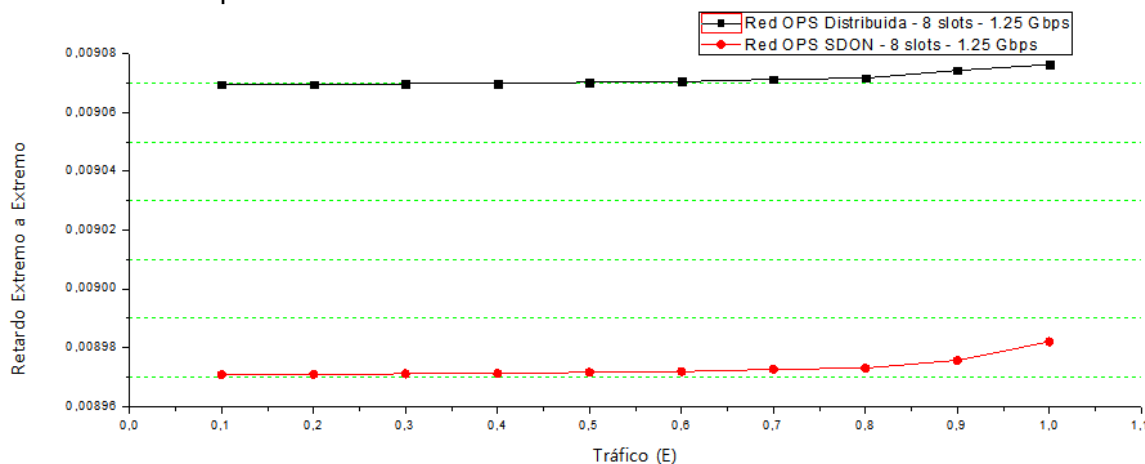


Figura 5.7 Retardo Extremo a Extremo vs Tráfico (E) para 8 slots a 1.25 Gbps.

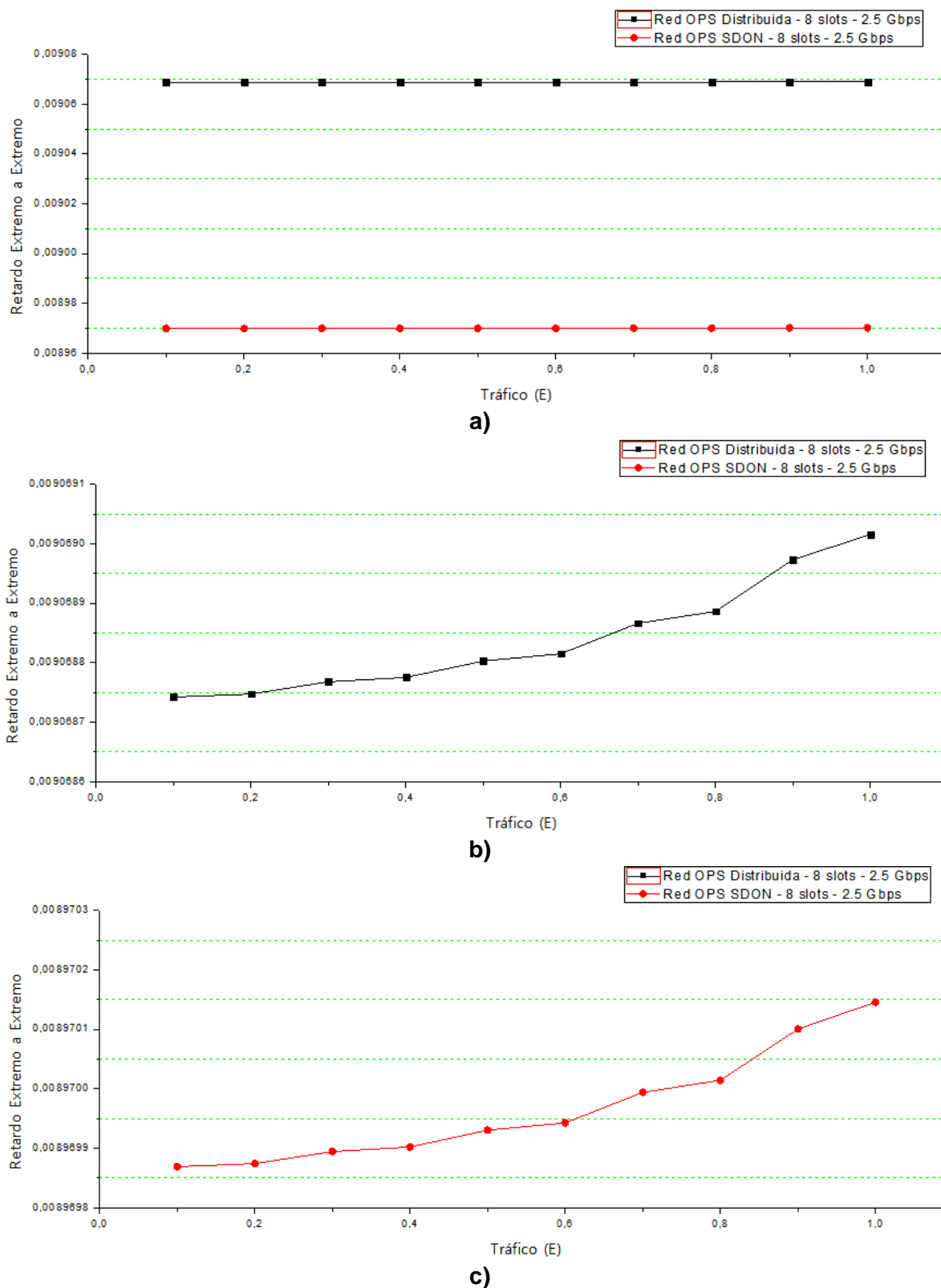


Figura 5.8 Retardo Extremo a Extremo vs Tráfico (E) para 8 slots a 2.5 Gbps. a) Dos Redes b) Distribuida c) Centralizada.

En las Figuras 5.7 y 5.8 se observa el comportamiento del Retardo Extremo a Extremo con respecto al aumento del tráfico en las dos redes para 1.25 y 2.5 Gbps respectivamente. La Figura 5.7 permite ver como es la variación de este retardo y la figura 5.8 presenta una

ampliación (partes b y c) ya que en su parte (a) no se puede ver el comportamiento del retardo. Según los resultados obtenidos en estas dos figuras, el retardo extremo a extremo aumenta cada vez que la densidad de tráfico en la red es más alta; así, las colas de paquetes a enviar crecen y cada paquete tarda más en ser enviado, ya que los recursos de la red disminuyen y el retardo aumenta. A partir de estas dos Figuras se logra ver como la red OPS SDON se comporta mejor en términos de retardo extremo a extremo que la red OPS Distribuida ya que al estar centralizada la red, en una ruta cualquiera se logra ahorrar tiempos de procesamiento en nodos intermedios para poder llegar al nodo destino.

En esta sección (5.5.1) se analizó comparativamente el desempeño de las redes OPS Distribuida y OPS SDON configuradas con 8 slots y para dos velocidades en los enlaces (1.25 y 2.5 Gbps). A partir de los resultados anteriormente expuestos se logra ver como la red centralizada tiene un mejor desempeño (en esta primera sección) con respecto a la red distribuida en términos de probabilidad de bloqueo y retardo extremo a extremo.

5.5.2 Simulación caso 1y 2, sub caso 2

Las redes OPS Distribuida y OPS SDON se simularon en la herramienta IDE OMNeT++ con la configuración de las Tablas 5.2 y 5.3. Los casos 1 y 2 corresponden a las redes OPS Distribuida y OPS SDON sobre una topología NSFNet, en las cuales se encuentran implementados los algoritmos de señalización (JET y JET adaptado), enrutamiento (Dijkstra) y asignación de recursos (algoritmo heurístico basado en LAUC). El sub caso2 tiene un espectro disponible de 200 GHz, es decir que se utilizan 16 slots en la red OPS Distribuida y 16 slots en la red OPS SDON, con espaciamientos de canal de 12.5 GHz. Se ejecutan las simulaciones con velocidades de transmisión de 1.25 Gbps y 2.5 Gbps (Sub caso 2.1, 2.2) en un tiempo de simulación de 0.075 s. A continuación se inicia el análisis comparativo entre las dos redes con el tráfico normalizado.

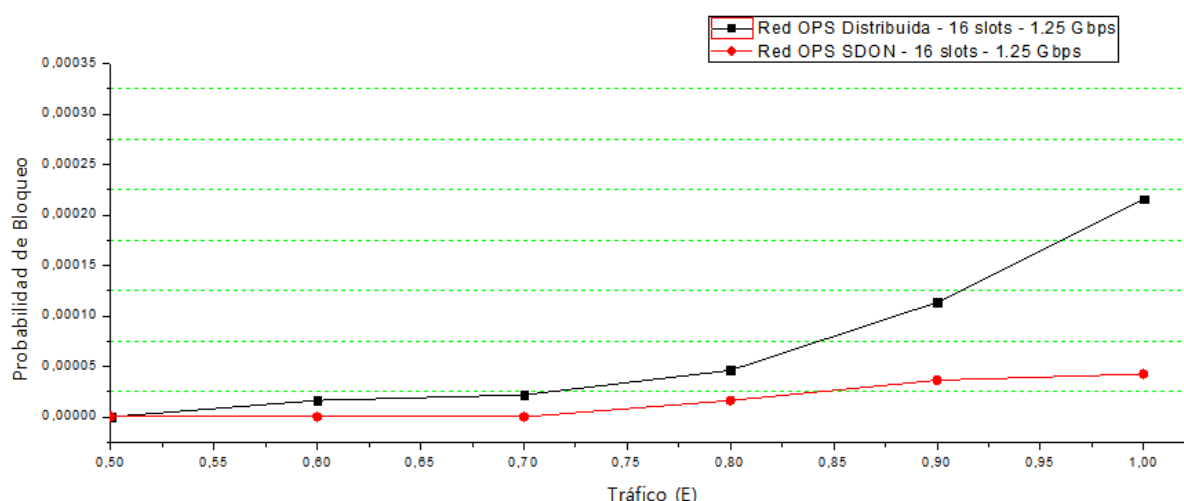


Figura 5.9 Probabilidad de Bloqueo vs Tráfico (E) para 16 slots a 1.25 Gbps.

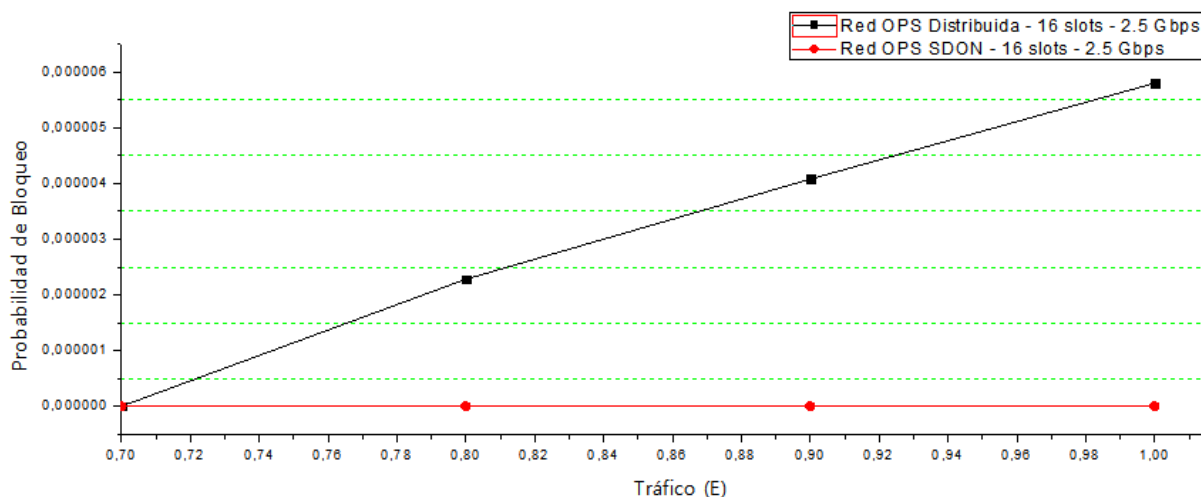


Figura 5.10 Probabilidad de Bloqueo vs Tráfico (E) para 16 slots a 2.5 Gbps.

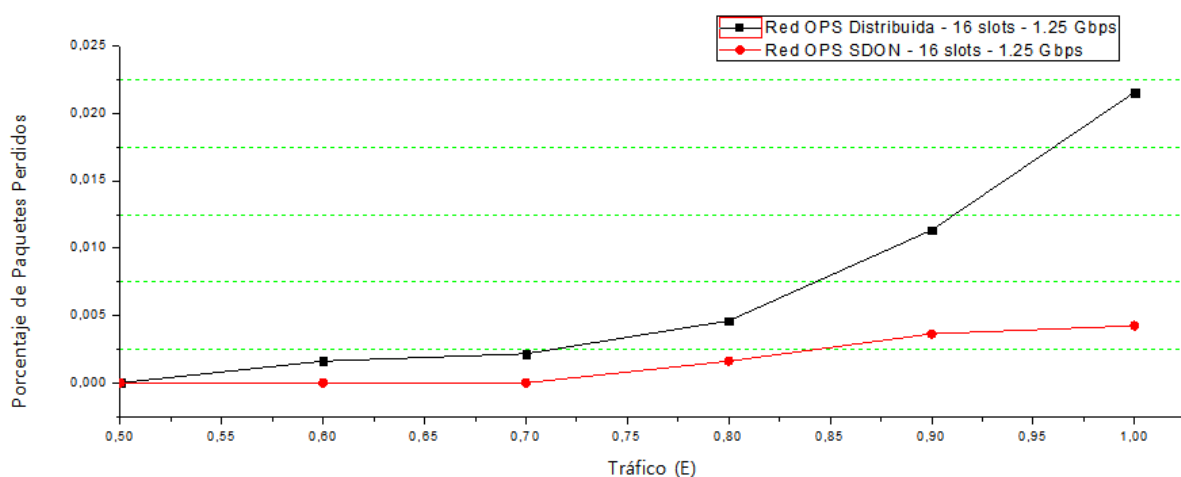


Figura 5.11 Porcentaje de Paquetes Perdidos vs Tráfico (E) para 16 slots a 1.25 Gbps.

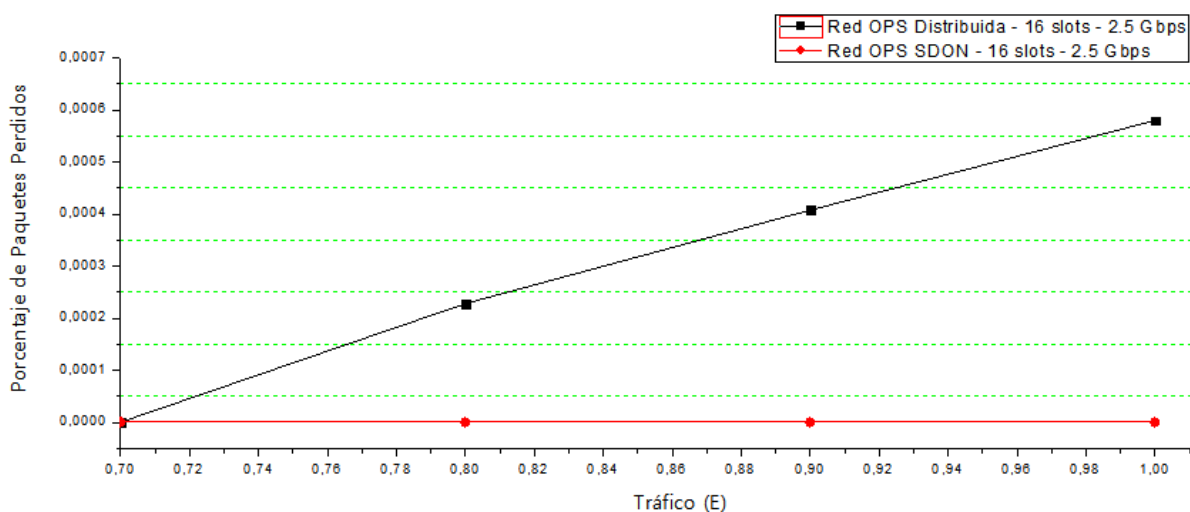
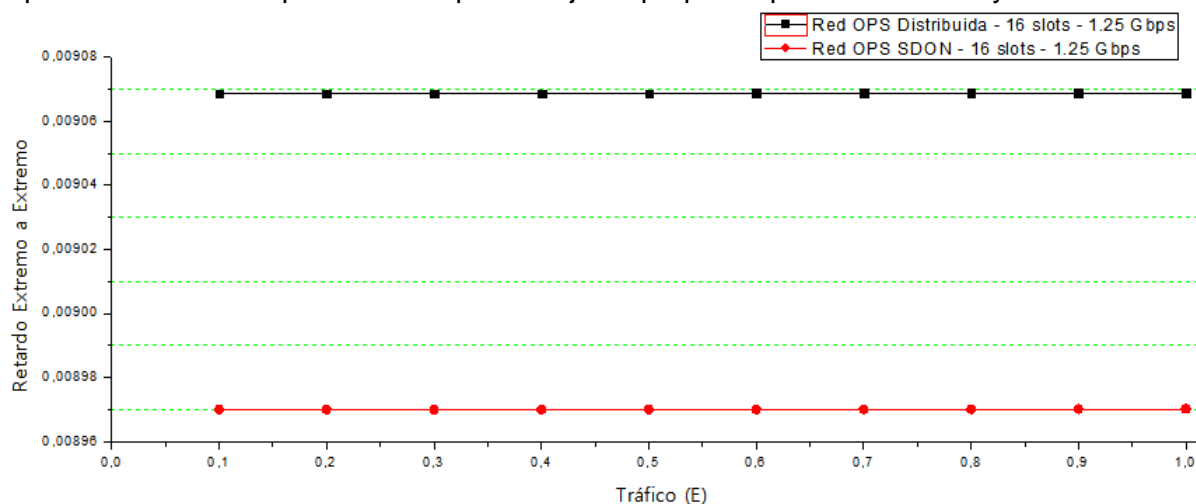


Figura 5.12 Porcentaje de Paquetes Perdidos vs Tráfico (E) para 16 slots a 2.5 Gbps.

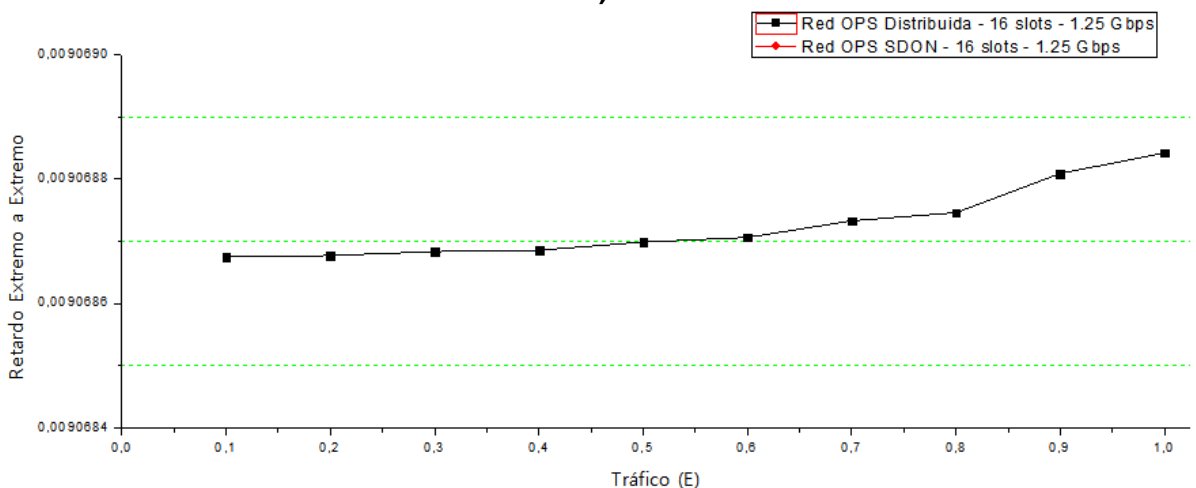
Las Figuras 5.9 y 5.10 muestran el comportamiento de la probabilidad de bloqueo en las redes con 16 slots y velocidades de 1.25 y 2.5 Gbps respectivamente. Las Figuras 5.11 y 5.12 muestran el porcentaje de paquetes perdidos en las redes con 16 slots y velocidades de 1.25 y 2.5 respectivamente. Estas cuatro figuras muestran comportamientos con respecto al

aumento del tráfico en cada red. Las Figuras 5.9 y 5.11 muestran el comportamiento de la probabilidad de bloqueo y el porcentaje de paquetes perdidos en las redes con respecto al aumento de tráfico en cada red, pero se inicia el tráfico en 0.5 Erlang debido a que desde 0.1 hasta 0.5 Erlang las redes funcionan idealmente, es decir que los valores de probabilidad de bloqueo y porcentaje de paquetes perdidos equivalen a cero (0). Esto se debe que las redes manejan un gran número de recursos y el tráfico no es tan alto con respecto a los tráficos generados desde 0.6 hasta 1 Erlang. Lo mismo ocurre con las Figuras 5.10 y 5.12 que muestran el comportamiento de la probabilidad de bloqueo y el porcentaje de paquetes perdidos en las redes con respecto al aumento de tráfico en cada red con la diferencia de que en estas se inician el tráfico en 0.7 Erlang.

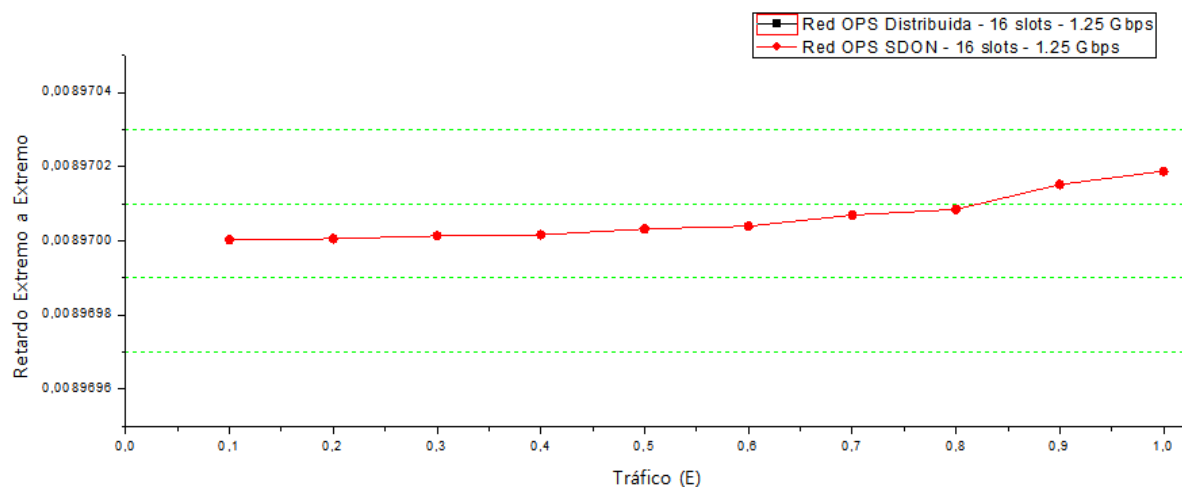
Los resultados obtenidos para la probabilidad de bloqueo y el porcentaje de paquetes perdidos en las Figuras 5.9, 5.10, 5.11 y 5.12 presentan un comportamiento similar al de los resultados obtenidos en el sub caso 1 (sección 5.5.1), es decir un aumento en los dos parámetros a medida que el tráfico aumenta con la excepción del comportamiento ideal que se presenta con algunos valores de tráfico explicados anteriormente donde los valores de los parámetros son cero (0). El espectro disponible (200 GHz) implica un mayor número de canales para transmitir paquetes, entonces el comportamiento de las redes demuestra que el sub caso 2 presenta un mejor desempeño que el sub caso 1, ya que en el sub caso 2 tanto la probabilidad de bloqueo como el porcentaje de paquetes perdidos disminuyen.



a)

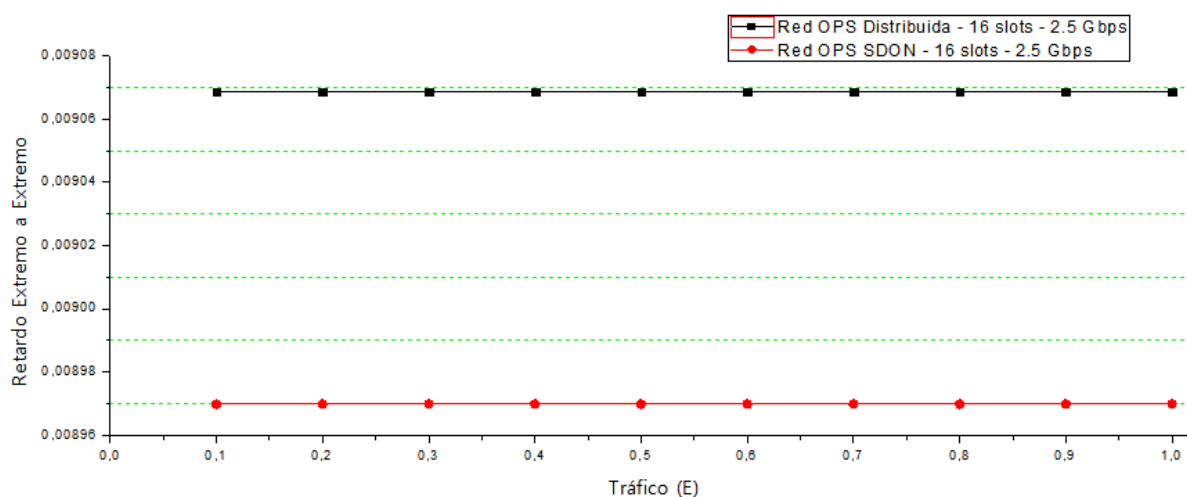


b)

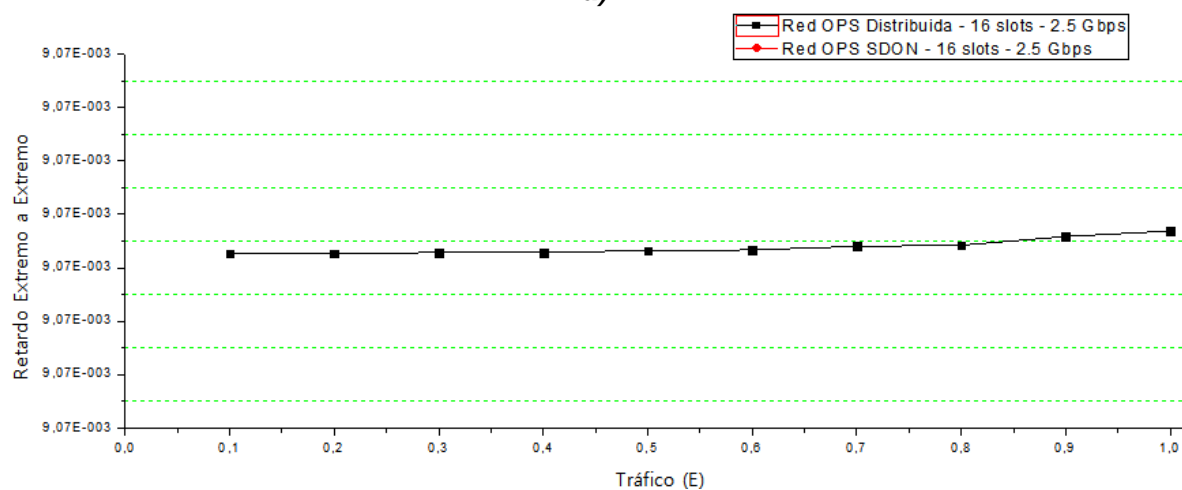


c)

Figura 5.13 Retardo Extremo a Extremo vs Tráfico (E) para 16 slots a 1.25 Gbps. a) Dos redes b) OPS Distribuida c) OPS SDON.



a)



b)

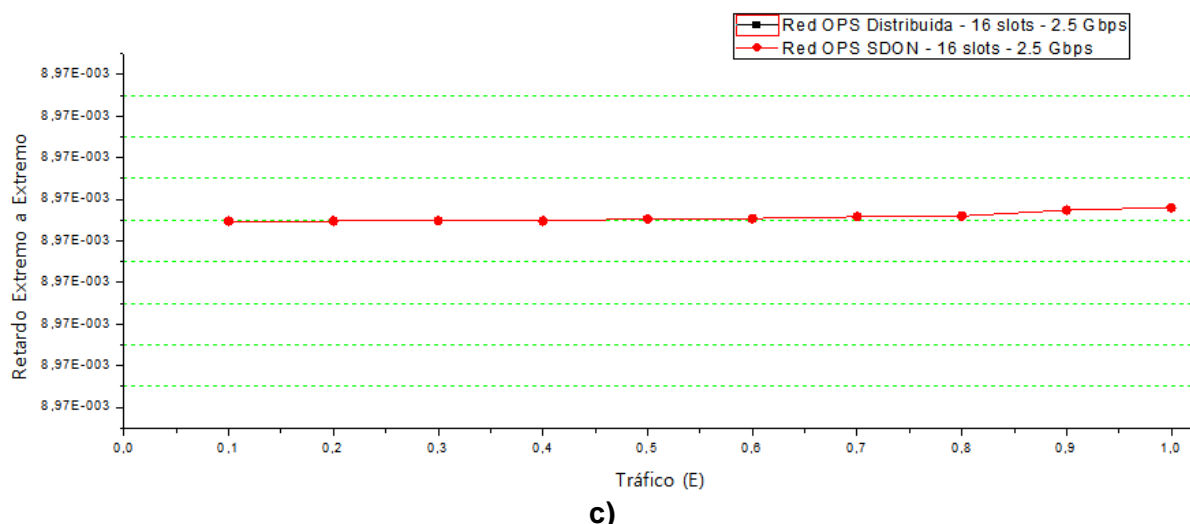


Figura 5.14 Retardo Extremo a Extremo vs Tráfico (E) para 16 slots a 2.5 Gbps. a) Dos redes b) OPS Distribuida c) OPS SDON.

En las Figuras 5.13 y 5.14 se muestra el comportamiento del retardo extremo a extremo en las redes con 16 slots y velocidad de los enlaces de 1.25 y 2.5 Gbps respectivamente. Estas dos figuras cuentan con una parte (a) donde no es posible apreciar el comportamiento del retardo; por eso, para las dos Figuras se hace una ampliación (partes b y c) con la cual es posible observar el comportamiento de los retardos. El retardo extremo a extremo de las Figuras 5.13 y 5.14 aumenta a medida que el tráfico es más alto; así, la red OPS SDON presenta un retardo más bajo con respecto a la OPS Distribuida, y por ende la OPS SDON presenta un mejor desempeño al disminuir el retardo en un 5% con respecto a la OPS Distribuida.

Gracias a los resultados obtenidos en las secciones 5.5.1 y 5.5.2 se analizó comparativamente el desempeño de las redes OPS Distribuida y OPS SDON, donde la red centralizada se comporta mejor con respecto a la distribuida en términos de probabilidad de bloqueo y retardo extremo a extremo; esto se debe a que el nodo central escoge la mejor ruta para el envío de un paquete y como se menciona en la sección anterior ahorra tiempos de procesamiento en los nodos y por ende reduce el retardo.

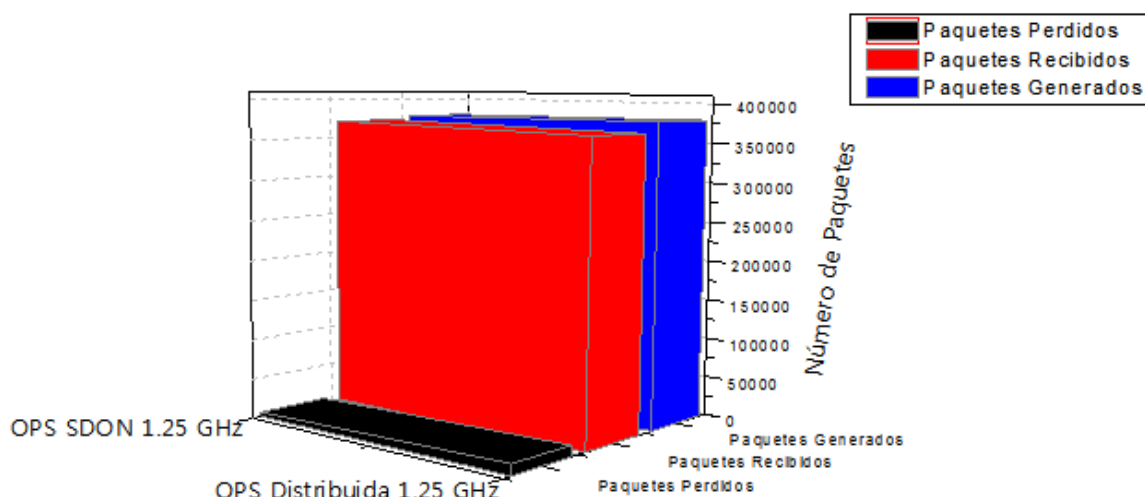


Figura 5.15 Paquetes Perdidos, Recibidos y Generados a 1.25 Gbps.

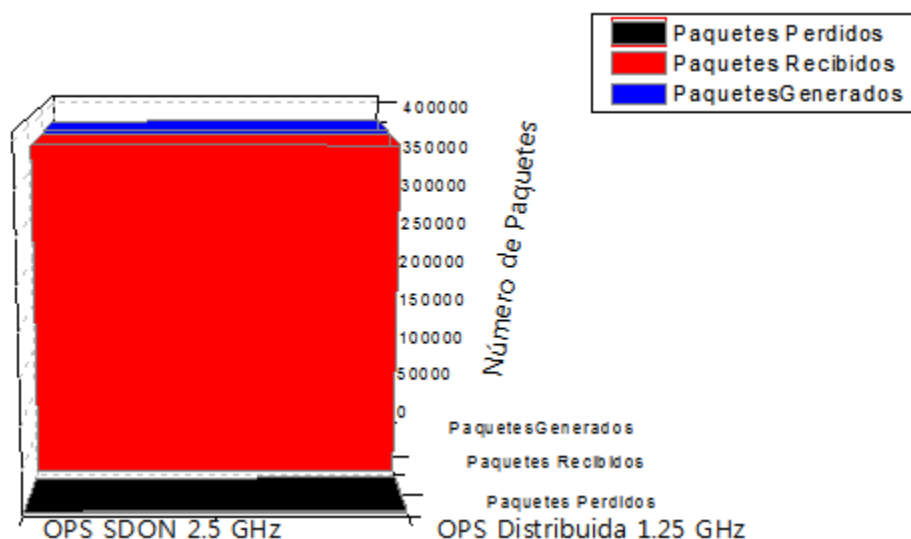


Figura 5.16 Paquetes Perdidos, Recibidos y Generados a 2.5 Gbps.

Las Figuras 5.15 y 5.16 muestran la cantidad de paquetes perdidos, recibidos y generados por las dos redes en los casos 1 y 2 para velocidades de enlace de 1.25 y 2.5Gbps respectivamente. En la Figura 5.15 se observa que la red distribuida genera más paquetes que la centralizada, sin embargo la cantidad de paquetes recibidos es mayor en la centralizada y se pierden más paquetes en la centralizada. Lo mismo ocurre en la Figura 5.16 en la cual se observa la misma tendencia con el doble de la velocidad en los enlaces. Cabe aclarar que el número de paquetes recibidos es mayor cuando se cuenta con más recursos en las redes, como es el caso de la Figura 5.16. El análisis hecho anteriormente (secciones 5.5.1 y 5.5.1) corrobora lo que se observa en las figuras 5.15 y 5.16.

Tabla 5.6 Resumen de los Resultados de las Simulaciones.

	Número de Slots	Velocidad de los enlaces	Probabilidad de Bloqueo promedio	Retardo Extremo a Extremo Promedio	Paquetes Perdidos
OPS Distribuida	8 Slots (100 GHz)	1.25 Gbps	0,06293279478353	0,00907130600506	27540
		2.5Gbps	0,00860481002578	0,00906883911237	3930
	16 Slots (200 GHz)	1.25 Gbps	0,00004133423572	0,00906872560270	20
		2.5Gbps	0,00000121583962	0,00906866385905	1
OPS SDON	8 Slots (100 GHz)	1.25 Gbps	0,02502291107252	0,00897307802537	10978
		2.5Gbps	0,00115231569221	0,00896996677713	515
	16 Slots (200 GHz)	1.25 Gbps	0,00000950253617	0,00897006028469	5
		2.5Gbps	0,00000000000000	0,00896979138095	0

Finalmente, en la Tabla 5.6 se muestra el resumen con los resultados de todas las simulaciones al variar el número de slots y las velocidades en los enlaces (secciones 5.5.1, 5.5.2); con los cuales se analiza comparativamente el desempeño de las dos redes en términos de probabilidad de bloqueo y retardo extremo a extremo. Cabe aclarar que la red OPS Distribuida y OPS SDON se encuentran sobre una misma topología de red NSFNet (ver Tabla 5.1). Tal como se aprecia en la Tabla 5.6, cada uno de los 4 casos particulares de la red OPS Distribuida presentan una probabilidad de bloqueo y un retardo extremo a extremo mayor si se compara 1 a 1 con la OPS SDON; es decir que se compara la OPS Distribuida con espectro disponible de 100 GHz (8 slots) a una velocidad de 1.25 con la OPS SDON en



la misma configuración y así sucesivamente. De esa manera el mejor caso con respecto a la probabilidad de bloqueo se da al comparar la OPS Distribuida-16 slots-2.5Gbps con la OPS SDON-16 slots-2.5Gbps, pero al presentar una de las dos configuraciones comportamiento ideal de una red el decremento es muy significativo y se asemeja a una red real. De acuerdo a esto, el mejor caso se da al comparar la OPS Distribuida-8 slots-2.5Gbps con la OPS SDON-8 slots-2.5Gbps ya que el decremento de la probabilidad de bloqueo se da en un 86.7%. Lo anteriormente dicho se comprueba con el número de paquetes perdidos que se encuentran en la Tabla 5.6, de acuerdo a este número es más fácil asimilar las probabilidades de bloqueo consignadas en la misma tabla. Por otro lado, al hacer la misma comparación para el retardo extremo a extremo se observa para cada uno de los 4 casos particulares que el decremento en este retardo ronda el 5%, favoreciendo a la red OPS SDON.

CAPITULO 6: CONCLUSIONES, RECOMEDACIONES 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.

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 OPS SDON tiene un mejor desempeño que la red OPS Distribuida, al presentar valores más bajos de probabilidad de bloqueo y retardo extremo a extremo de los paquetes.

- Los dos modelos de redes ópticas (OPS SDON y OPS Distribuida) tienen mejor desempeño cuando se exponen a bajas cantidades de tráfico; sin embargo, cuando se configura un tráfico alto en las redes, la red OPS SDON se comporta de mejor manera al mostrar menor número de paquetes perdidos y menor retardo extremo a extremo.

- El desempeño de las redes ópticas (OPS SDON y OPS Distribuida) está relacionado de forma directa con la velocidad de transmisión de los enlaces, ya que al aumentar la velocidad de transmisión, la probabilidad de bloqueo y el retardo extremo a extremo de los paquetes en las dos redes disminuye, puesto que los paquetes tardan menor tiempo en viajar por los caminos ópticos y por lo tanto se presenta menor congestión.

- Con la implementación de la red OPS SDON, se logra comprobar que centralizar las funciones de red (enrutamiento y asignación de espectro) mejora el desempeño de una red manteniendo 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 SDON y OPS está en auge debido a la mejora de las capacidades de hardware de los dispositivos actuales.

- Uno de los inconvenientes que surgieron en el desarrollo de este trabajo de grado, se presentó al realizar las simulaciones, puesto que inicialmente se ejecutaron simulaciones con parámetros de carga muy altos que abortaban el proceso de simulación con tiempos relativamente cortos; esto se debía a que las redes en una primera instancia realizan una sobrecarga de tráfico, antes de empezar a enviar los primeros paquetes.

- Otro inconveniente que surgió en el desarrollo de este trabajo de grado, se presentó cuando se elegía el tiempo offset durante el diseño de la red y la simulación de la misma, puesto que este parámetro es de vital importancia para optimizar los recursos disponibles y disminuir la pérdida de paquetes, de forma independiente del modelo de red.

- Finalmente, se registró un inconveniente con los equipos con menores características de hardware puesto que presentaban problemas cuando se requería realizar simulaciones con parámetros altos de carga en los dos modelos de simulación.

6.1.3 Respecto a la herramienta de simulación

- OMNeT++ se considera una elección acertada debido a las características ofrecidas para la construcción de modelos de simulación. Sin embargo requiere un tiempo de aprendizaje amplio puesto que exige conocimientos de programación orientada a objetos en C++ y un tiempo de familiarización.

- La versión 4.6 de OMNeT++ para Windows, que fue utilizada para modelar las redes, presenta un problema de inestabilidad y bloqueo cuando se ejecutan grandes tiempos de simulación, que implican una limitante en cuanto al parámetro variable de tiempo. Sin embargo, éste no fue un inconveniente con respecto a las simulaciones puesto que en los tiempos de simulación utilizados para los escenarios no se presentó este problema.

- La herramienta ORIGIN PRO 8.6 fue una gran elección para realizar las gráficas puesto que presenta gran flexibilidad y facilidad en el uso de la misma. ORIGIN PRO 8.6 permite la representación de datos de diferentes formas dependiendo de las necesidades del usuario y brindando imágenes 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 con altas capacidades de procesamiento (procesadores de últimas generaciones preferiblemente Intel y memoria RAM de 8GB o superior) para evitar problemas de saturación y bloqueo en las simulaciones.

- Antes de realizar las simulaciones es importante adoptar y aplicar una metodología de simulación que permita realizar de manera organizada este proceso, de tal manera que se puedan analizar los parámetros elegidos de forma concisa y con la mayor claridad, en los resultados obtenidos.

- El uso de OMNeT++ presenta una complejidad elevada, por lo que se sugiere una familiarización y entrenamiento previo en el lenguaje de programación C++ con el fin de facilitar el manejo del mismo.

6.3 TRABAJOS FUTUROS

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

- Analizar el desempeño OPS SDON al implementar técnicas de asignación de espectro semi elástico y elástico, ya que en este trabajo de grado se usó la técnica de asignación fija.



- Analizar el desempeño de diferentes algoritmos RSA en una OPS SDON, puesto que en este trabajo de grado se utilizó de manera secuencial R+SA, específicamente Dijkstra + LAUC.
- Analizar el impacto al usar velocidades de transmisión superiores a los 2.5Gbps en el desempeño de redes OPS SDON, ya que en este trabajo se realizaron simulaciones con velocidades bajas (1.25 y 2.5 Gbps).
- Analizar el desempeño de OPS SDON utilizando heurísticas y meta heurísticas para dar solución al problema de enrutamiento y asignación de espectro.
- Analizar el desempeño de una OPS SDON al implementar el protocolo OPENFLOW para gestionar los recursos.
- Analizar el desempeño de una OPS SDON y una red centralizada con conmutación óptica de flujo.

REFERENCIAS

- [1] D. B. Rawat and S. R. Reddy, "Software Defined Networking Architecture, Security and Energy Efficiency: A Survey," *IEEE Communications Surveys and Tutorials.*, vol. 19, no.1, pp. 325–346, 2017. [En Línea]. doi:10.1109/COMST.2016.2618874
- [2] M. Ojo, D. Adami, and S. Giordano, "A SDN-IoT architecture with NFV implementation," *IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps 2016 – Proceedings.*, 2016. [En Línea]. doi:10.1109/GLOCOMW.2016.7848825
- [3] J. M. Sanchez, B. Yahia, and N. Crespi, "Self-modeling based diagnosis of services over programmable networks," *IEEE NETSOFT 2016 - 2016 IEEE NetSoft Conference and Workshops: Software-Defined Infrastructure for Networks, Clouds, IoT and Services.*, pp. 277–285, Sep. 2016. [En Línea]. doi:10.1109/NETSOFT.2016.7502423
- [4] R. Vilalta, A. Mayoral, R. Casellas, R. Martinez, and R. Munoz, "Experimental demonstration of distributed multi-tenant cloud/fog and heterogeneous SDN/NFV orchestration for 5G services," *EUCNC 2016 - European Conference on Networks and Communications.*, pp. 52–56, 2016. [En Línea]. doi:10.1109/EuCNC.2016.7561003
- [5] A. S. Thyagaturu, A. Mercian, M. P. McGarry, M. Reisslein y W. Kellerer, "Software Defined Optical Networks (SDONs): A Comprehensive Survey," *IEEE Communications Surveys and Tutorials.*, vol. 18, no. 4, pp. 2738–2786, May. 2016. [En Línea] doi: 10.1109/COMST.2016.2586999
- [6] J. Matias, J. Garay, N. Toledo, J. Unzilla, and E. Jacob, "Toward an SDN-enabled NFV architecture," *IEEE Communications Magazine.*, vol. 53, no. 4, pp. 187–193, 2015. [En Línea]. doi:10.1109/MCOM.2015.7081093
- [7] R. Vilalta, I. Popescu and A. Mayoral, "End to End SDN/NFV Orchestration of Video Analytics Using Edge and Cloud Computing over Programmable Optical Networks," *Optical Society of America.*, pp. 7–9, 2017. [En Línea] doi:10.1364/OFC.2017.W3I.1
- [8] S. Huang, Y. Zhou, S. Yin, Q. Kong, M. Zhang, Y. Zhao and W. Gu, "Fragmentation assessment based on-line routing and spectrum allocation for intra-data-center networks with centralized control," *Optical Switching and Networking.*, vol.14, no. 3, pp. 274–281, 2014. [En Línea]. doi:10.1016/j.osn.2014.05.011
- [9] Y. Zhao, L. Hu, W. Wang, Y. Li, and J. Zhang, "Performance verification of network function virtualization in software defined optical transport networks," *Optical Fiber Technology.*, vol. 33, pp. 89–95, 2017. [En Línea] doi:10.1016/j.yofte.2016.11.012
- [10] 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.
- [11] Open Networking Foundation, "SDN Architecture Overview, Version 1.1, ONF TR-504," Palo Alto, CA, USA, Nov. 2014. [En Línea], Disponible en:

https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/technical-reports/TR_SDN-ARCH-Overview-1.1-11112014.02.pdf

[12] J. Restrepo, "Análisis de los procesos básicos de un sistema de comunicaciones," en *Compendio de telecomunicaciones 2.*, Universidad de Medellín, sello editorial Universidad de Medellín, 2007, pp.27-31.

[13] W. Tomasi, "Multiplexado," en *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas.*, México, pp. 708-758, 2003.

[14] 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, Sangolquí, Ecuador, 2011.

[15] ITU-T, "ITU-T G.694.1: Spectral Grids For WDM Applications: DWDM Frequency Grid," 2012.

[16] ITU-T, "ITU-T G.694.2: Spectral grids for WDM applications: CWDM Wavelength Grid," 2003.

[17] C. Zuñiga y A. Sevilla, "Análisis comparativo del desempeño de algoritmos RSA y RWA sobre una red óptica basada en la topología NSFNeT," Tesis de Pregrado, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2017.

[18] R. Gómez, "Estudio y análisis de pérdidas en redes de fibra óptica basadas en el estándar SONET/SDH y su evolución hacia DWDM," Tesis de Pregrado, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, 2008.

[19] M. Tena, "Evaluación de Arquitecturas de Red Híbridas OBS / OCS," Tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2009.

[20] Z. Ding, Z. Xu, X. Zeng, T. Ma y 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. [En Línea] doi:10.1117/1.OE.53.4.046105

[21] J. G. López Perafán, "Diseño de métodos cross layer cognitivos para redes de comunicación óptica de ráfagas (OBS)," Tesis Doctoral, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2014.

[22] W. Puche, G. Montoya, J. E. Sierra y Y. Donoso, "Tecnologías de Transporte Óptico: hacia Optical Burst Switching (OBS)," *Investigaciones Aplicadas.*, Vol. 1, no 4, pp. 41–52, 2008. [En Línea], Disponible en: <https://revistas.upb.edu.co/investigacionesaplicadas/article/view/153>

[23] N. Barakat y E. H. Sargent, "Analytical modeling of offset-induced priority in multiclass OBS networks," *IEEE Transactions on Communications.*, vol. 53, no. 8, pp. 1343–1352, Ago. 2005. [En Línea] doi:10.1109/TCOMM.2005.852845

- [24] C. Qiao y M. Yoo Lorenz, "Choices, Features and Issues in Optical Burst Switching" *Systems Communications Proceedings.*, vol. 1, pp.2-7, Nov. 1999. [En Línea], Disponible en: <http://www.cse.buffalo.edu/~qiao/ONOBS.pdf>
- [25] Joon-Pyo Park y Man-Seop Lee, "Simultaneous Burst and Burst Control Packet Transmission Protocol for Optical Burst Switching Ring Networks," *ETRI Journal.*, vol. 29, no.1, pp.116-119, Feb. 2007. [En Línea] doi:10.4218/etrij.07.0206.0148
- [26] T. Battestilli y H. Perros "An Introduction To Optical Burst Switching," *IEEE Optical Communications.*, pp. 10–15, Ago. 2003. [En Línea] doi: 10.1109/MCOM.2003.1222715
- [27] Y. Xiong, M. Vandenhoute y H. C. Cankaya, "Control architecture in optical burst-switched WDM networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 18, no. 10, pp. 1838–1851, 2000. [En Línea] doi: 10.1109/49.887906
- [28] W. Yao y B. Ramamurthy, "Dynamic Traffic Grooming using Fixed-Alternate Routing in WDM Mesh Optical Networks," *Int. Conf. Broadband Networks (Broadnets 2004).*, pp. 3-7, Jul. 2004. [En Línea], Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/cfae/eee38544a4d32b3c17c61ea75bd090e5eb8c.pdf>
- [29] J. Y. Choi, J. S. Choi y M. Kang, "Dimensioning burst assembly process in optical burst switching networks," *IEICE Trans. Commun.*, vol. 38, no. 10, pp. 55–63, Oct. 2005. [En Línea] doi: 10.1093/ietcom/e88-b.10.3855
- [30] C. Castaño y F. Amaya, "Conmutación de paquetes en el dominio óptico," *Revista en telecomunicaciones e informática.*, vol. 2, no. 4, pp. 25–42, Dic. 2012. [En Línea], Disponible en: <https://revistas.upb.edu.co/index.php/telecomunicaciones/article/view/3303/2904>
- [31] E. Ibarra y H. A. Enriquez, "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.
- [32] J. Calderon y E. Aguas, "Detección y análisis de fallos en redes de conmutación de ráfagas ópticas," Tesis de Pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. Colombia, 2015.
- [33] G. N. Rouskas y L. Xu, Optical Packet Switching. Raleigh, Carolina del Norte, USA: Departamento de Ciencias Informáticas de la Universidad Estatal de Carolina del Norte, 2004, Cap. 1, pp. 1–19.
- [34] M. Itoiz y J. Algueta, Optical Burst Switching (OBS): Conmutación óptica de ráfagas. Pamplona, Navarra, España: Universidad de Navarra, 2017, pp. 1–4.
- [35] M. Yoo y C. Quiao, "A High Speed Protocol for Bursty Traffic in Optical Networks," *Systems Communications Proceedings.*, pp. 23- 30, Ago. 2007. [En Línea] doi:10.1109/LEOST.1997.619129

- [36] C. Qiao y M. Yoo, "Optical Burst Switching (OBS) - A New Paradigm for an Optical Internet," *J. High Speed Networks.*, vol. 8, no. 716, pp. 69–84, 1999. [En Línea] doi: 10.1.1.41.8998
- [37] W. Velásquez, "Emulación de una red definida por software utilizando MiniNet," *Esc. Técnica Super. Ing. en Telecomunicaciones (ETSIT - UPM)*, p. 8, 2013. [En Línea], Disponible en: https://www.academia.edu/5730624/Emulaci%C3%B3n_de_una_red_definida_por_software_utilizando_MiniNet
- [38] R. Villaroel, "Aplicación de SDN en redes ópticas: análisis preliminar," Tesis de Pregrado, Universidad de Valladolid, Valladolid, España, 2015.
- [39] T. Nadeau y K. Gray, *SDN: Software Defined Networks*. Hurlbut, California, USA. O'Reilly Media, 2013, Cap. 2, pp. 10-38.
- [40] C. Spera, "Software Defined Network: el futuro de las arquitecturas de red," *Logicalis Now.*, pp. 42–45, Mar. 2013. [En Línea], Disponible en: <https://www.la.logicalis.com/globalassets/latin-america/logicalisnow/revista-20/lnow20-nota-42-45.pdf>
- [41] D. Maldonado, "Diseño e implementación de una aplicación bajo una Arquitectura SDN," Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2014.
- [42] Open Networking Foundation, "OpenFlow Switch Specification, Version 1.5.1, ONF TS-025," Palo Alto, California, USA, Mar. 2015. [En Línea], Disponible en: <https://www.opennetworking.org/wp-content/uploads/2014/10/openflow-switch-v1.5.1.pdf>
- [43] A. García, C. Rodríguez, C. Calderón y F. Casmartíño, "Controladores SDN, elementos para su selección y evaluación," *Rev. Telemática.*, vol. 13, no. 3, pp. 10–20, sept. 2014. [En línea], Disponible en: <http://revistatelematica.cujae.edu.cu/index.php/tele>
- [44] N. Gude, T. Koponen, J. Pettit, B. Pfaff, M. Casado, N. McKeown y S. Shenker, "NOX: towards an operating system for networks," *SIGCOMM Computer Communication Review.*, vol. 38, no. 3, pp. 105–110, 2008. [En Línea] doi: 10.1145/1384609.1384625
- [45] C. Yanez y F. Gallegos, "Implementación de un prototipo de red definida por software para el Hotspot-Epoch mediante un controlador basado en OpenFlow," Tesis de Pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2015.
- [46] D. Erickson, "The beacon OpenFlow controller," *Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Hot topics in software defined networking - HotSDN '13.*, p. 13, 2013. [En Línea] doi: 10.1145/2491185.2491189
- [47] S. Asadollahi, B. Goswami, A. S. Raoufy y H. Domingos, "Scalability of software defined network on floodlight controller using OFNet," *2017 International Conference on Electrical, Electronics, Communication Computer Technologies and Optimization Techniques (ICEECCOT).*, pp. 57–61, Ene. 2018. [En Línea] doi: 10.1109/ICEECCOT.2017.8284567

- [48] S. Asadollahi, B. Goswami y M. Sameer, "Ryu Controller's Scalability Experiment on Software Defined Networks," *2018 IEEE International Conference on Current Trends in Advanced Computing (ICCTAC)*., pp. 2-3, Jun. 2018. [En Línea] doi: 10.1109/ICCTAC.2018.8370397
- [49] R. K. Arbettu, R. Khondoker, K. Bayarou y F. Weber, "Security analysis of OpenDaylight, ONOS, Rosemary and Ryu SDN controllers," *2016 17th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks)*., pp. 37-44, Nov. 2016. [En Línea] doi: 10.1109/NETWKS.2016.7751150
- [50] O. Salman, I. H. Elhajj, A. Kayssi y A. Chehab, "SDN controllers: A comparative study," *2016 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*., pp. 2-4, Jun. 2016. [En Línea] doi: 10.1109/MELCON.2016.7495430
- [51] L. Mamushiane, A. Lysko y S. Dlamini, "A comparative evaluation of the performance of popular SDN controllers," *2018 Wireless Days (WD)*., pp. 54-59, Abr. 2018. [En Línea] doi: 10.1109/WD.2018.8361694
- [52] P. Bhaumik, S. Zhang, P. Chowdhury, S. Lee y J. Lee, "Software-defined optical networks (SDONs): a survey," *Photonic Network Communications*., vol. 28, no. 1, pp. 4-18, Jun. 2014. [En Línea] doi: 10.1007/s11107-014-0451-5
- [53] M. Armbrust, A. Fox, R. Griffith, R. Katz y I. Stoica, "A view of cloud computing," *Communications of the ACM*., vol. 53, no. 4, p. 50, Abr. 2010. [En Línea] doi: 10.1145/1721654.1721672
- [54] Z. Xiao, W. Song y Q. Chen, "Dynamic Resource Allocation using Virtual Machines for Cloud Computing Environment," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*., vol. 24, no. 6, pp. 1107-1117, Jun. 2013. [En Línea] doi: 10.1109/TPDS.2012.283
- [55] C. Chen, X. Chen, M. Zhang, S. Ma, Y. Shao y Z. Zhu, "Demonstrations of Efficient Online Spectrum Elastic Optical Networks," *Journal of lightwave technology*., vol. 32, no. 24, pp. 4701-4711, Dic. 2014. [En Línea] doi: 10.1109/JLT.2014.2364515
- [56] B. Zhao, X. Chen, J. Zhu y Z. Zhu, "Survivable Control Plane Establishment With Live Control Service Backup and Migration in SD-EONs," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*., vol. 8, no. 6, pp. 371-381, Jun. 2016. [En línea] doi: 10.1364/JOCN.8.000371
- [57] R. Muñoz, R. Vilalta, R. Casellas, R. Martinez, T. Szyrkowiec, A. Autenrieth y D. López, "Integrated SDN/NFV Management and Orchestration Architecture for Dynamic Deployment of Virtual SDN Control Instances for Virtual Tenant Networks [Invited]," *Journal of Optical Communications and Networking*., vol. 7, no. 11, pp. B62-B70, Nov. 2015. [En Línea]. doi:10.1364/JOCN.7.000B62

- [58] S. Gringeri, N. Bitar y T. Xia, "Extending software defined network principles to include optical transport," *IEEE Communications Magazine*., vol. 51, no. 3, pp. 32–40, Mar. 2013. [En Línea] doi:10.1109/MCOM.2013.6476863
- [59] J. He, R. Norwood, M. Brandt, I. Djordjevic, M. Cvijetic, S. Subramaniam y B. Lynn, "A survey on recent advances in optical communications," *Computers & Electrical Engineering*., vol. 40, no. 1, pp. 216–240, Ene. 2014. [En Línea] doi: 10.1016/j.compeleceng.2013.11.017
- [60] A. Sadasivarao, S. Syed, P. Pan, C. Liou y C. Guok, "Open transport switch: a software defined networking architecture for transport networks," *Proc. ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking*., pp. 115–120, 2013. [En Línea], Disponible en: <http://conferences.sigcomm.org/sigcomm/2013/papers/hotsdn/p115.pdf>
- [61] A. Panda, S. Shenker, M. McCauley, T. Koponen y M. Casado, "Extending SDN to large-scale networks," *Proc. ONS13 Research Track*., pp. 1-2, Abr. 2013. [En Línea], Disponible en: <http://www.cs.columbia.edu/~lierranli/coms6998-10SDNFall2014/papers/Xbar-ONS2013.pdf>
- [62] R. Nejabati, S. Peng, B. Gou, M. Channegowda y D. Simeonidou, "Toward a completely softwareized optical network [invited]," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*., vol. 7, no. 12, pp. B222–B231, Dic. 2015. [En Línea] doi: 10.1364/JOCN.7.00B222
- [63] S. Lee, K. Li y M. Wu, "Design and implementation of a GPON-based virtual OpenFlow-enabled SDN switch," *Journal of Lightwave Technology*., vol. 34, no. 10, pp. 2552–2561, May. 2016. [En Línea] doi: 10.1109/JLT.2016.2540244
- [64] M. Forzati y A. Gavler, "Flexible next-generation optical access," *2013 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*., pp. 1–8, Jun. 2013. [En Línea] doi: 10.1109/ICTON.2013.6602912
- [65] P. Pavón, "Contribución a la conmutación óptica de paquetes. Arquitecturas, Evaluación de Prestaciones y Análisis comparativo," Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena (Murcia), España 2004.
- [66] G. Puerto, "Redes de conmutación de paquetes ópticos basadas en el intercambio de etiquetas multiplexadas por subportadora," Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2007.
- [67] M. Nizam, Ivan Andonovic y D. Hunter, "Designing an optimum WDM transport network: control architectures, node requirements and performance", *Proc. Soc. Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*., vol. 3531, pp. 244-255, Oct. 1998. [En Línea] doi: doi.org/10.1117/12.327063
- [68] P. Pavón, J. García, J. Malgosa y F. Cerdán, "Algoritmo Óptimo de Selección de Longitud de Onda en Arquitecturas de Conmutación Óptica de Paquetes SCWP," *IV Jornadas de Ingeniería Telemática (Jitel 2003)*., pp. 153-160, Sep. 2003.

- [69] S. Donza, L. Frances y J. Costa, "Spectrum Allocation Policies in Fragmentation Aware and Balanced Load Routing for Elastic Optical Networks," *ICDS 2015: The Ninth International Conference on Digital Society.*, pp. 46-51, 2015. [En Línea], Disponible en: https://www.thinkmind.org/download.php?articleid=icds_2015_2_40_10126
- [70] B. Chatterjee, N. Sarma y E. Oki, "Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial," *IEEE Communications Surveys and Tutorials.*, vol. 17, no. 3, pp.1776-1800, Mar. 2015. [En línea] doi:10.1109/COMST.2015.2431731
- [71] R. Fávero, "Nova Estratégia de Desfragmentação de Canais para Redes Ópticas Elásticas," Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica de Campinas, Campinas, Brasil, 2015.
- [72] L. Virgili, "Caracterización de tráfico dinámico en redes ópticas elásticas," Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2012.
- [73] A. de Lerma, "Algoritmos de planificación para redes elásticas," Tesis de pregrado, Universidad autónoma de Madrid, Madrid, España, 2013.
- [74] A. Garcia, "Elastic Spectrum Allocation in Flexgrid Optical Networks," Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2012.
- [75] S. Shakya, "Management of Spectral Resources in Elastic Optical Networks," Tesis Doctoral, Universidad estatal de Georgia, Atlanta, USA, 2015.
- [76] I. Olszewski, "Algorithms of Routing and Spectrum Assignment in Spectrum Flexible Transparent Optical Networks," *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY.*, pp.258-253, Oct. 2013. [En Línea], Disponible en: <http://pe.org.pl/articles/2013/10/62.pdf>
- [77] P. Sayad, "Dynamic Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Network," Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2014.
- [78] R. Wang y B. Mukherjee, "Spectrum management in heterogenous bandwidth optical networks," *Opt. Switching and Networking.*, vol. 11, no. 1, pp. 83-91, Ene. 2014. [En Línea] doi: 10.1016/j.osn.2013.09.003
- [79] J. Comellas y G. Junyent, "Improving Link Spectrum Utilization in FlexGrid Optical Networks," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking.*, vol. 7, no. 7, pp. 618-627, Jul. 2015. [En Línea] doi:10.1364/JOCN.7.000618
- [80] B. Catterjee y E. Oki, "Performance Evaluation of Spectrum Allocation Policies for Elastic Optical Networks," *2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON).*, pp. 1-4, Ago. 2015. [En Línea] doi:10.1109/ICTON.2015.7193485
- [81] I. Olszewski, "Spectrum Allocation Policy in Elastic Optical Networks," *Intl journal of electronics and telecommunications.*, vol. 63, no. 4, pp. 423-429, Sep. 2017. [En Línea] doi:10.1515/eletel-2017-0053

[82] O. Gonzáles, “Rendimiento de TCP y Cálculo de Rutas en Redes de Conmutación Óptica de Ráfagas,” Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid, Valladolid, España, 2012.

[83] C. Leiserson, T. Cormen, R. Rivest y C. Stein, *Introduction to Algorithms*, 3ra ed. Montreal, Quebec, Canadá: McGraw-Hill Book Company, 2009, cap. 1, pp. 115.

[84] J – sim. [En Línea], Disponible en: <https://www.physiome.org/jsim/>

[85] 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. [En Línea], Disponible en: http://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/68446/1/desdesimulando_omnet_capitulouno.pdf

[86] C. Hernández, y J. Vicente, “Introducción al simulador de redes NS-2”, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2011. [En Línea], Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12735/Art%C3%ADculo%20docente%20NS-2.pdf?sequence=1>

[87] Departamento de ingeniería telemática, “OPNET: Manual de usuario”, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2004– 2005. [En Línea], Disponible en: http://ansat.es/soporte/docs/fragmentacion/OPNET_Modeler_Manual.pdf

[88] OMNeT++ User manual Version 4.6, OMNeT, 2014. [En Línea], Disponible en: <https://omnetpp.org/doc/omnetpp4/Manual.pdf>

[89] 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.

[90] M. Nord, S. Bjornstad y C. M. Gauger, “OPS or OBS in the Core Network? - A Comparison of Optical Packet- and Optical Burst Switching,” *Telenor R&D.*, vol. 1, no. 4, pp. 1-20, 2003. [En Línea], Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/fa06/9d1ca76c007f4d3ca8ccee36e5f2cfec696f.pdf>