

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA RED OBS COST239  
MEDIANTE SWARM INTELLIGENCE APLICANDO EL  
ALGORITMO ACO PARA RESOLVER EL PROBLEMA RWA**



**Eider Fabián Ibarra Bermúdez  
Henry Alexander Enríquez Muñoz**

---

*Director: Ph.D. (C) Ing. José Giovanni López Perafán*

**Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Telecomunicaciones  
Grupo de I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones  
GNTT  
Línea de Investigación Señales y Sistemas de  
Telecomunicaciones  
2015**



**EIDER FABIÁN IBARRA BERMÚDEZ  
HENRY ALEXANDER ENRÍQUEZ MUÑOZ**

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA RED OBS COST239  
MEDIANTE SWARM INTELLIGENCE APLICANDO EL  
ALGORITMO ACO PARA RESOLVER EL PROBLEMA RWA**

**Trabajo de Grado presentado como requisito parcial  
para la obtención del título de:**

**Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones.**

**Director:  
Ph.D. (C) Ing. José Giovanni López Perafán**

**Popayán  
2015**



# Tabla de Contenido

<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>3</b>
<b>Lista de Tablas</b> .....	<b>5</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b> .....	<b>6</b>
<b>Capítulo 1 Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1. Justificación y Motivación.....	1
1.2. Objetivos .....	3
1.3. Enfoque.....	4
1.4. Alcance .....	6
1.5. Aportes.....	6
1.6. Metodología .....	7
1.7. Organización de la Tesis.....	8
<b>Capítulo 2 Marco Teórico</b> .....	<b>9</b>
2.1. Técnicas de Multiplexación Usadas en Redes Ópticas .....	9
2.2. Sistemas de Conmutación Óptica.....	13
2.3. Arquitectura Red por Conmutación Óptica de Ráfagas .....	15
2.4. Protocolos de Reserva de Recursos.....	22
2.5. Algoritmos de Planificación .....	24
2.6. Mecanismos de Resolución de Contienda .....	26
2.7. Red COST239 OBS/DWDM .....	27
2.8. RWA en WDM/OBS .....	29
2.9. Algoritmo de Dijkstra .....	31
2.10. Teoría de Enjambres .....	32
2.11. Metaheurísticas Basadas en Colonias de Hormigas.....	35
2.12. Elección de la Herramienta de Simulación OMNeT++ .....	39
<b>Capítulo 3 Modelo de Simulación de la Red COST239 Empleando el Algoritmo de Colonia de Hormigas para la Solución del Problema RWA</b> .....	<b>45</b>
3.1. El Modelo General para la Simulación de Redes OBS/WDM (MGSR-OBS/DWDM).....	46
3.2. El Núcleo del MGSR-OBS/DWDM.....	47
3.3. Biblioteca de Módulos .....	54
3.4. Implementación del Modelo de tráfico .....	55
3.5. La Herramienta Software OBS Network Configurator .....	57
3.6. Implementación del ACO para la solución del Problema RWA.....	58
3.7. Modelo de la Red Europea COST239 .....	63

<b>Capítulo 4 Escenarios de Simulación y Pruebas</b> .....	<b>67</b>
4.1. Fase 1. Generación del Escenario y Casos de Simulación. ....	67
4.2. Fase 2. Identificación de Parámetros de los Escenarios de Simulación del Plan de Pruebas. ....	69
4.3. Fase 3. Ejecución de las Simulaciones .....	71
4.4. Fase 4. Análisis de Resultados de las Simulaciones .....	72
<b>Capítulo 5 Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros</b> .....	<b>87</b>
5.1. Conclusiones.....	87
5.2. Recomendaciones .....	88
5.3. Trabajos Futuros .....	89
<b>Referencias</b> .....	<b>91</b>

## Lista de Figuras

Figura 1.1. Enfoque del trabajo de grado. ....	5
Figura 2.1. Sistema WDM. Adaptada de [32]. ....	10
Figura 2.2. Esquema de WDM. Tomada de [32]. ....	11
Figura 2.3. Distribución de los canales DWDM en el Espectro Óptico. Tomada de [34]. ....	12
Figura 2.4. Comparación del espectro de CWDM vs DWDM. Tomada de [38].	13
Figura 2.5. Espaciamiento entre canales para DWDM y CWDM. Tomada de [39]. ....	13
Figura 2.6. Diagrama de funciones en OBS. Adaptada de [43]. ....	15
Figura 2.7. Esquema Red OBS. Tomada de [31]. ....	16
Figura 2.8. Estructura del paquete de control. Tomada de [35]. ....	17
Figura 2.9. Arquitectura Enrutador de Borde. Tonada de [31] [48]. ....	20
Figura 2.10. Arquitectura Enrutador Central. Tomada de [31] [48]. ....	21
Figura 2.11. Funcionamiento Básico de JET. Tomado de [53]. ....	24
Figura 2.12. Funcionamiento del Algoritmo de planificación Horizonte. Tomada de [54]. ....	26
Figura 2.13. Vista simplificada de la arquitectura de la red OBS. Tomada de [23]. ....	28
Figura 2.14. Red COST239. Adaptada de [24]. ....	29
Figura 2.15. Mapa Conceptual Parcial de Teoría de Enjambres. Tomada de [12]. ....	33
Figura 2.16. Mapa Conceptual Parcial de Inteligencia de Enjambre. Tomada de [12]. ....	34
Figura 2.17. Decisión Hormiga Ruta Inicial Adaptada de [77]. ....	37
Figura 2.18. Aporte Feromona. Experimento Simon Goss. Adaptada de [77]. ...	37
Figura 2.19. Jerarquía De Módulos en OMNeT++. ....	42
Figura 3.1. Estructura en Capas del MGSR-OBS/DWDM. ....	46
Figura 3.2. Módulo <i>IngressEgressNode</i> . ....	52
Figura 3.3. Módulo Nodo Switching o Núcleo. ....	53
Figura 3.4. Módulo <i>SimpleNetworkTrafficGenerator</i> . ....	56

Figura 3.5. Módulo Funcionamiento Básico ACO.....	63
Figura 3.6. Implementación de la Red COST239.....	64
Figura 3.7. Módulo <i>EdgeCoreBlock</i> .....	64
Figura 4.1.Red COST239 OBS/DWDM Implementada. ....	72
Figura 4.2. Porcentaje Pérdida de Paquetes.....	73
Figura 4.3. Porcentaje Pérdida de Ráfagas.....	73
Figura 4.4. Probabilidad de Bloqueo .....	74
Figura 4.5. Probabilidad de Bloqueo .....	76
Figura 4.6. Porcentaje de Pérdidas de paquetes.....	77
Figura 4.7. Porcentaje de Pérdida de ráfagas .....	77
Figura 4.8. Probabilidad de Bloqueo .....	79
Figura 4.9. Porcentaje de Pérdida de Paquetes .....	79
Figura 4.10. Porcentaje de Pérdida de Ráfagas.....	79
Figura 4.11. Probabilidad de Bloqueo .....	80
Figura 4.12. Porcentaje de Pérdida de Paquetes .....	80
Figura 4.13. Porcentaje de Pérdida de Ráfagas.....	81
Figura 4.14. Retardo Extremo a Extremo Paquetes, 1.76Gbps, 16 Lambdas Dijkstra.....	83
Figura 4.15. Retardo Extremo a Extremo Paquetes, 1.76Gbps, 16 Lambdas ACO.....	83
Figura 4.16. Retardo Extremo a Extremo Paquetes, 35.2Gbps, 16 Lambdas Dijkstra.....	83
Figura 4.17. Retardo Extremo a Extremo Paquetes, 35.2Gbps, 16 Lambdas, ACO .....	83
Figura 4.18. Retardo extremo a Extremo Ráfagas, 1.76Gbps, 16 lambdas Dijkstra.....	84
Figura 4.19. Retardo extremo a Extremo Ráfagas, 1.76Gbps, 16 lambdas ACO .....	84
Figura 4.20. Retardo extremo a Extremo ráfagas, 35.2Gbps, 16 Lambdas Dijkstra.....	85
Figura 4.21. Retardo extremo a Extremo ráfagas, 35.2Gbps, 16 Lambdas ACO .....	85

## Lista de Tablas

Tabla 2.1. Parámetros en Redes CWDM y DWDM.....	12
Tabla 2.2. Comparación de sistemas de conmutación óptica. [42]. ....	14
Tabla 2.3. Comparación de mecanismos de reserva. Adaptada de [52] .....	22
Tabla 2.4. Parametrización de las herramientas de simulación. Adaptada de [80].....	40
Tabla 4.1. Escenario y Casos de Simulación .....	69
Tabla 4.2. Variables Primarias y Secundarias del Enlace de Comunicación. ....	70
Tabla 4.3. Plan de Pruebas de Simulación. ....	71
Tabla 4.4. Descripción de Equipos Usados en la Simulación.....	71
Tabla 4.5. Tabla de Resultados Variación de Longitudes de Onda.....	75
Tabla 4.6. Tabla de Resultados Implementación de Mecanismo de Resolución de Contienda. ....	78
Tabla 4.7. Tabla de Resultados Variación de Protocolo de Asignación de Recursos.....	82

## Lista de Abreviaturas

<b>ACO</b>	<i>Ant Colony Optimization</i> , Optimización por Colonia de Hormigas.
<b>AI</b>	<i>Artificial Intelligence</i> , Inteligencia Artificial.
<b>BCP</b>	<i>Burst Control Packet</i> , Paquete de Control de Ráfaga.
<b>COST</b>	<i>European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research</i> , Cooperación Europea en el campo de la Investigación Científica y Técnica.
<b>CWDM</b>	<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División Aproximada de Longitud de Onda.
<b>DR</b>	<i>Delayed Reservation</i> , Reservación Atrasada.
<b>DWDM</b>	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa.
<b>EA</b>	<i>Evolutionary Algorithms</i> , Algoritmos Evolutivos.
<b>EC</b>	<i>Evolutionary Computation</i> , Computación Evolutiva.
<b>EDFA</b>	<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> , Amplificador de Fibra Dopada por Erbio.
<b>EON</b>	<i>European Optical Network</i> , Red Óptica Europea.

<b>FDM</b>	<i>Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Frecuencia.
<b>FO</b>	<i>Optical Fiber</i> , Fibra Óptica.
<b>JET</b>	<i>Just Enough Time</i> , Solo el Tiempo Suficiente.
<b>JIT</b>	<i>Just In Time</i> , Tiempo Justo.
<b>ITU</b>	<i>International Telecommunications Union</i> , Unión Internacional de Telecomunicaciones.
<b>LAUC</b>	<i>Latest Available Unscheduled Channel</i> , Último Canal Disponible sin Planificación.
<b>LED</b>	<i>Light Emission Diode</i> , Diodo Emisor de Luz.
<b>MGSR OBS/DWDM</b>	<i>The General Model for Networks Simulation OBS/DWDM</i> , Modelo General para la Simulación de Redes OBS/DWDM.
<b>NED</b>	<i>Network Editor</i> , Editor de Redes.
<b>NP</b>	<i>Non Deterministic Polynomial Time</i> , Tiempo Polinomial no Determinístico.
<b>OBS</b>	<i>Optical Bursts Switching</i> , Conmutación Óptica de Ráfagas.
<b>OCS</b>	<i>Optical Circuit Switching</i> , Conmutación Óptica de Circuitos.
<b>OPS</b>	<i>Optical Packet Switching</i> , Conmutación Óptica de Paquetes.
<b>OXC</b>	<i>Optical Cross-Connect</i> , Matriz de Conmutación Óptica.

<b>RWA</b>	<i>Routing and Wavelength Assignment</i> , Enrutamiento y Asignación de Longitudes de Onda.
<b>SDM</b>	<i>Space Division Multiplex</i> , Multiplexación por División de Espacio.
<b>SI</b>	<i>Swarm Intelligence</i> , Inteligencia de Enjambres.
<b>TAG</b>	<i>Tell and Wait</i> , Contar y Seguir.
<b>TAW</b>	<i>Total and Available Wavelengths</i> , Longitudes de Onda Totales y Disponibles.
<b>TDM</b>	<i>Time Division Multiplex</i> , Multiplexación por División en el Tiempo.
<b>WDM</b>	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de Onda.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Justificación y Motivación

El mundo vive en constante evolución a nivel tecnológico [1] y manejo de la información. Éste fenómeno es conocido como “sociedad de la información” [2], en la que se destaca el conocimiento (datos y aplicaciones) como el principal recurso de negocio, dando paso a la “economía del conocimiento” [3]. La tecnología ha evolucionado en relación con la información en diferentes aspectos, entre los que cabe resaltar el almacenamiento de información, el aumento de la velocidad de transmisión y una mayor difusión. En consecuencia, día tras día las redes de telecomunicaciones buscan suplir estas exigencias [4].

Uno de los principales avances tecnológicos a nivel de medios de transmisión de datos es la creación de la fibra óptica [5], con la cual se ha dado solución a muchas de las exigencias nombradas anteriormente; este cuenta con un sin número de ventajas [6] frente a otros medios de transmisión, entre las que están: la inmunidad a interferencias electromagnéticas, su seguridad y el gran ancho de banda, lo que permite flujos elevados de información, siendo este el medio idóneo para la transmisión de datos.

Pese a esto, las redes ópticas tienen diferentes problemas y desventajas, a nivel de infraestructura y al pretender hacer uso eficiente de los recursos. El Enrutamiento y Asignación de Longitudes de Onda (RWA, *Routing and Wavelength Assignment*) [7] [8], es el problema fundamental en redes ópticas que implementan la Multiplexación por División de Longitudes de Onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*) [9]. Este consiste en encontrar rutas y asignar longitudes de onda para definir caminos ópticos entre un transmisor y un receptor, aumentar el ancho banda ofrecido por la red y permite hacer uso óptimo de los recursos disponibles. Resolver RWA no es sencillo, es un problema conocido como problema de Tiempo Polinomial no Determinístico

Completo (NP, *Non Deterministic Polynomial Time*) [10] [11], por lo que es abordado desde diferentes enfoques y técnicas. Una de ellas es la Inteligencia de Enjambres (SI, *Swarm Intelligence*), que se considerará en este trabajo de grado.

La Conmutación Óptica de Ráfagas (OBS, *Optical Burst Switching*) es una técnica utilizada en las redes de comunicación ópticas. Esta técnica optimiza y disminuye considerablemente el tiempo de conmutación, ya que evita la conversión óptica-eléctrica y eléctrica-óptica que se hace en los nodos de conmutación. OBS busca optimizar la búsqueda de rutas, mejorando así el problema de enrutamiento presente en RWA.

Frente a los retos que presenta el problema RWA, se han adoptado técnicas que buscan optimizar los procesos y los métodos como los algoritmos bio-inspirados, han mostrado simplicidad y eficiencia en la solución de problemas complejos [12], los cuales se implementaran para solucionar RWA.

Para contextualizar, los algoritmos bio-inspirados, se debe hablar de Inteligencia Artificial (AI, *Artificial Intelligence*) [13], que tuvo sus inicios en 1943, cuando Alan Turing definió la neurona [14], y una de sus aplicaciones es la búsqueda de la solución óptima en problemas complejos o de alta complejidad [15].

Según Hertz y Kobler [16], las técnicas para optimización han evolucionado progresivamente a algoritmos basados en poblaciones, a estos se les conoce como algoritmos de Computación Evolutiva (EC, *Evolutionary Computation*) [15]. La EC representa un amplio grupo de técnicas que se dividen en dos grandes grupos que son los Algoritmos Evolutivos (EA, *Evolutionary Algorithms*) y SI [15] [17]. Estos grupos se componen de diferentes técnicas: este trabajo de grado se enfocó en la rama de SI y sus principios [18], que se basan en el estudio del comportamiento colectivo de los bio-inspirados. Dentro de SI se encuentra la Optimización por Colonia de Hormigas (ACO, *Ant Colony Optimization*) [19], que hace parte de la familia de algoritmos desarrollados por Dorigo [20], basado en el comportamiento social de las hormigas.

Con este trabajo de grado se busca abordar el problema RWA presente en las redes ópticas OBS basadas en WDM, por medio de un modelo de simulación, aplicado a una red OBS existente. En este caso se tomará la red de la Cooperación Europea en el Campo de la Investigación Científica y Técnica (COST, *European Cooperation in the*

*field of Scientific and Technical Research*) 239<sup>1</sup>. En la que se busca observar el comportamiento del problema RWA y evaluar su desempeño en relación a la implementación del algoritmo de optimización<sup>2</sup> ACO.

La pregunta que se desea resolver con este trabajo de grado es:

¿Es posible mediante la implementación de ACO en SI resolver el problema RWA y mejorar el desempeño de redes OBS-WDM?

El desarrollo del trabajo de grado a través de esta pregunta, podría generar nuevas alternativas para mejorar las características no deseadas que el problema RWA presenta en redes ópticas OBS-WDM, y en el mejor de los casos, podría resolver inconvenientes en el desempeño de tales redes. Es de resaltar, además, que actualmente en Colombia se está desarrollando el proyecto nacional de fibra óptica que busca conectar a 1.078 municipios a redes de fibra óptica y pasar del 29% al 96% de cobertura de municipios con esta tecnología [21], por lo que sería un gran aporte a la sociedad tecnológica Colombiana.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

Analizar comparativamente el desempeño de la red OBS (*Optical Burst Switching*) COST239 respecto a RWA (*Routing and Wavelength Assignment*), a nivel de simulación, mediante SI (*Swarm Intelligence*), con y sin la implementación del algoritmo de optimización ACO (*Ant Colony Optimization*).

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar a nivel de simulación mediante la herramienta OMNeT++ el problema RWA en la red OBS COST239.
- Implementar el algoritmo de optimización ACO de SI en la red OBS COST239.

---

<sup>1</sup>Hace parte de un proyecto Europeo de una red totalmente óptica, que consta de once nodos y que abarca las principales ciudades de Europa.

<sup>2</sup> Método numérico que encuentra un valor o solución de una función objetivo, que a su vez es llamada la solución óptima.

- Analizar y comparar mediante simulación el desempeño de la red con y sin la implementación del algoritmo de optimización ACO.

### 1.2.3. Objetivos Adicionales

- Desarrollar un modelo general para la simulación de redes OBS/DWDM. Este modelo debe ser modular, extensible, altamente configurable y aplicable a diversas topologías de red y técnicas de enrutamiento y planificación.
- Desarrollar una herramienta software de uso académico, que permita crear y configurar fácil y rápidamente diversos modelos de redes OBS/DWDM basados en el modelo de simulación desarrollado.

## 1.3. Enfoque

Para el desarrollo del presente trabajo de grado, se realizó un estudio bibliográfico sobre las temáticas a tratar, recopilando y analizando en investigaciones similares las implementaciones realizadas.

Continuando, se creó en primer lugar, el Modelo General para la Simulación de Redes OBS/DWDM (MGSR OBS/DWDM), cuyo propósito principal es definir un modelo aplicable en diversos tipos de redes y topologías de red OBS/DWDM. El MGSR OBS/DWDM está formado por un núcleo, o base, que define la estructura del modelo y por un conjunto de módulos que definen sus funcionalidades específicas. De esta manera, es posible realizar diversas implementaciones de varios aspectos del funcionamiento de una red OBS tales como el enrutamiento, la planificación o la conmutación óptica.

A la par de la creación del MGSR OBS/DWDM, se creó una herramienta software sobre la plataforma .Net de Microsoft, denominada *OBS Network Configurator* con la que se facilitan las tareas de configuración de los modelos implementados o desarrollados.

Una vez que el MGSR OBS/DWDM fue desarrollado, se procedió a crear los módulos necesarios para implementar la solución particular del problema RWA basada en ACO. Por otra parte, también se procedió a realizar una implementación del problema RWA basada en el algoritmo de Dijkstra, con el fin de tener un punto de comparación para

evaluar el desempeño obtenido empleando ACO. Finalmente, se procedió a crear el modelo particular de la red a simular y se procedió a evaluar su comportamiento para las dos soluciones del problema RWA realizadas. La red elegida para este trabajo de grado es la red COST239 OBS/DWDM, la cual hace parte de un proyecto Europeo de redes totalmente ópticas.

Posterior a la implementación del modelo se realizó la evaluación del desempeño de la red, probando las implementaciones tanto para Dijkstra, como para ACO y probando su desempeño frente a la pérdida de paquetes, ráfagas y probabilidad de bloqueo.

Para tener más claridad sobre el enfoque, la Figura 1.1. permite visualizar de forma general, cada uno de los pasos que deben desarrollarse para el cumplimiento del objetivo general de este trabajo de grado.

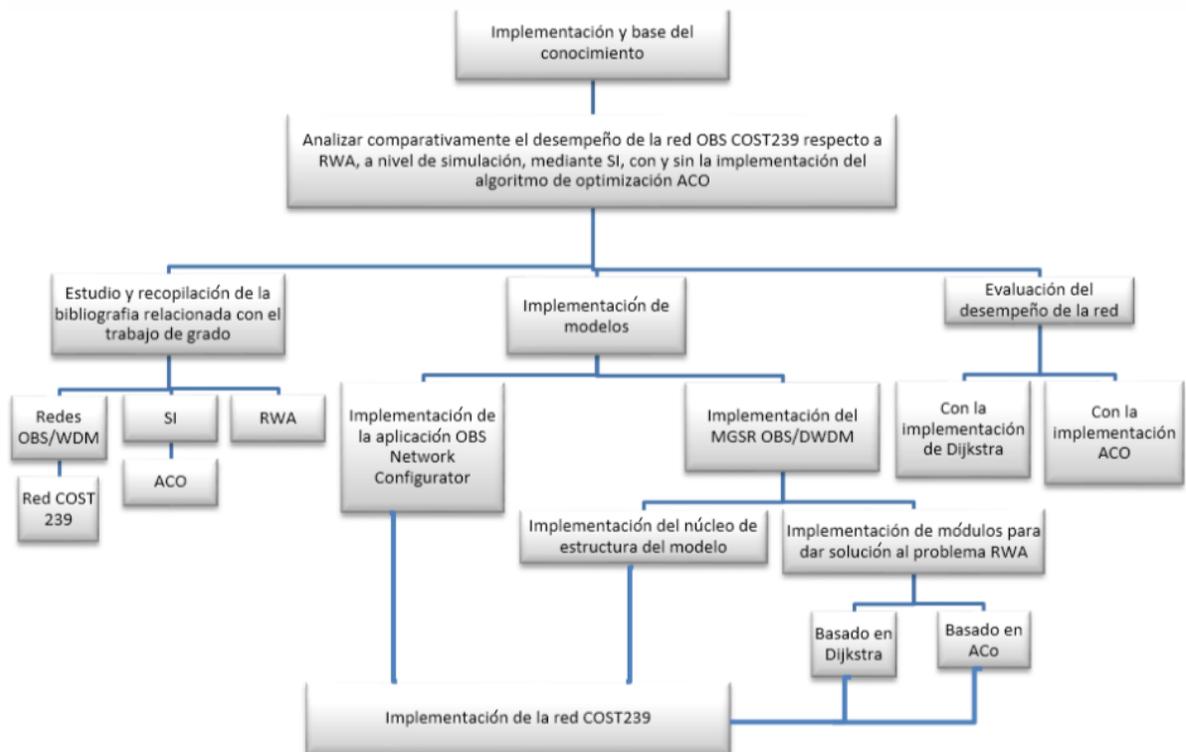


Figura 1.1. Enfoque del trabajo de grado.

## 1.4. Alcance

En este trabajo de grado se simula la red COST239 OBS/DWDM, esta red, promueve la cooperación en investigación y desarrollo entre la industria, las universidades y centros de investigación en las principales ciudades de Europa [22]. COST239 “Ultra Alta Capacidad de las redes de transmisión óptica”, ha estudiado la viabilidad de una red todo-óptica, que consta de once nodos, con la cual, se lleva todo el tráfico internacional entre los principales centros de Europa [23] [22] [24].

Con el fin de analizar el desempeño de la red, respecto a RWA, siendo que WDM da lugar a RWA [24], se abordó este problema mediante la implementación de SI con el algoritmo de optimización ACO, que busca mejorar las tareas de enrutamiento y asignación de las longitudes de onda. Reflejándose en la optimización del número de saltos o el número de conmutaciones de longitudes de onda, visto con el estudio y observación de parámetros como el retardo extremo a extremo, probabilidad de bloqueo, pérdida de ráfagas, tráfico sobre el enlace (*Throughput*).

## 1.5. Aportes

El desarrollo de este trabajo de grado se considera un aporte a las líneas de investigación y desarrollo del departamento de Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, en el área específica de sistemas de comunicaciones ópticas.

Los aportes logrados mediante el análisis del desempeño de una red OBS, al implementar un algoritmo de optimización ACO para resolver el problema de RWA, son:

- Implementación del núcleo del modelo de simulación MGSR OBS/DWDM.
- Implementación de una biblioteca de módulos de las funcionalidades abstractas definidas por el núcleo o de extenderlas.
- Aplicación *OBS Network Configurator*, para implementación y caracterización de redes OBS/DWDM.
- Desarrollo del modelo de simulación de la red COST239 OBS/DWDM basado en MGSR OBS/DWDM.
- Desarrollo del algoritmo ACO de SI, para su implementación.

- Implementación y simulación del desempeño de redes OBS, con y sin el algoritmo de optimización ACO, mediante la utilización de la herramienta OMNeT++.
- Informe referente a la investigación sobre el análisis de desempeño de una red COST239 OBS/DWDM aplicando SI utilizando el algoritmo de optimización ACO para resolver el problema RWA.

## **1.6. Metodología**

A continuación se presenta la adaptación de la metodología que se tuvo como base para el desarrollo de este trabajo de grado. Está basada en los lineamientos señalados en el “Modelo Integral para un Profesional en Ingeniería” [25] de la siguiente manera:

### **1.6.1. EL MODELO DE INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL [26]**

Se utilizó para obtener una base conceptual en las temáticas y tecnologías presentes en este trabajo de grado.

### **1.6.2. EL MODELO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA [25]**

Se utilizó como referencia para adaptar el algoritmo de optimización ACO al enrutamiento de la red OBS/DWDM.

### **1.6.3. EL MODELO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE SOLUCIONES [27]**

Se utilizó como referencia para diseñar e implementar un prototipo de la red OBS/DWDM COST239 OBS/DWDM, que permita evaluar su desempeño con y sin la implementación del algoritmo ACO para la resolver el problema RWA mediante simulación.

### **1.6.4. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN**

Con el objetivo de realizar un análisis comparativo del desempeño de la red COST239 OBS/DWDM con y sin la implementación del algoritmo de optimización ACO para resolver el problema RWA, se adapta una metodología de simulación basada en la guía para simular sistemas de telecomunicaciones [28] y el modelo para la construcción de soluciones [27], permitiendo a través de una serie de fases alcanzar

los objetivos propuestos en el presente trabajo de grado. Los pasos definidos para desarrollar metodológicamente el proceso de simulación y análisis de resultados son:

Fase 1 - Generación de escenarios y casos de simulación.

Fase 2 - Identificación de parámetros de los escenarios de simulación y elaboración del plan de pruebas.

Fase 3 - Ejecución de las simulaciones.

Fase 4 - Análisis de resultados de las simulaciones.

## 1.7. Organización de la Tesis

En el Capítulo 2 se muestran los conceptos básicos y temáticas relacionados con la tecnología óptica, redes OBS/DWDM, Inteligencia Artificial, Inteligencia de enjambres, Algoritmos de Optimización ACO, RWA, entre otros. Brindado una base del conocimiento para este trabajo de grado.

El capítulo 3 describe el proceso de implementación y caracterización en el simulador OMNeT++ de la red COST239 OBS/DWDM, Especificando cada uno de los módulos que lo componen y se describe la implementación que se desarrolló para el algoritmo ACO. En este capítulo se menciona la implementación del MGSR OBS/DWDM, la biblioteca base de módulos, en especial de los módulos encargados de Dijkstra y ACO; de una aplicación, la cual facilita el proceso de implementación de la red que será simulada sobre OMNeT++, esta aplicación tiene como nombre *OBS Network Configurator* y es utilizada para caracterizar, configurar e implementar todos los componentes de la red COST239 OBS/DWDM. Para mayor información, ver el Anexo C.

El Capítulo 4 muestra los escenarios de simulación y pruebas, para la evaluación y análisis de desempeño de la red COST239 OBS/DWDM mediante SI con y sin la aplicación del algoritmo ACO para resolver el problema RWA. Estas pruebas se realizaron en la herramienta software de simulación OMNeT++.

Finalmente, el Capítulo 5 contiene las conclusiones, recomendaciones y propuestas para trabajos futuros relacionados con éste trabajo de grado.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Técnicas de Multiplexación Usadas en Redes Ópticas

Debido al crecimiento de las comunicaciones y al alto costo de los enlaces de comunicación, surgió la necesidad de optimizar el uso de los recursos con los que se cuenta en una red. Una de las estrategias para conseguirlo consiste en desarrollar técnicas de multiplexación, que permiten compartir, en forma eficaz, un mismo medio entre diferentes sistema de comunicaciones, teniendo como objetivo minimizar la cantidad de líneas físicas requeridas y maximizar el uso del ancho de banda.

En el contexto de las telecomunicaciones ópticas se tienen tres esquemas generales de multiplexación: Multiplexación por División en el tiempo (TDM, *Time Division Multiplex*), Multiplexación por División de Espacio (SDM, *Space Division Multiplex*) y WDM [29].

#### 2.1.1. WDM

Esta tecnología se desarrolló con el fin de aumentar la capacidad de transporte de las redes ópticas [5] [24], permitiendo la implementación de diferentes velocidades de transmisión de datos y protocolos sobre el mismo enlace [30], en la actualidad WDM no solo cumple esta tarea, sino que también está siendo utilizado para optimizar tareas de enrutamiento [31].

WDM es un modelo análogo a la multiplexación por división de frecuencia (FDM, *Frequency Division Multiplexing*)<sup>3</sup>, la magnitud de la longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia de la misma [32]. WDM asigna a cada canal una longitud de onda distinta<sup>4</sup>, así como FDM le asigna a cada canal una frecuencia portadora diferente. El esquema general de una red óptica WDM consta de un transmisor WDM, una serie de segmentos de fibra y un receptor WDM, ver Figura 2.2. En un transmisor, el multiplexor recibe cada uno de los canales con su respectiva longitud de onda, los combina y los transmite sobre la misma Fibra Óptica (FO), el espectro del canal óptico resultante contendrá todas las longitudes de onda, luego, durante el proceso de recepción, un demultiplexor divide el canal según la información de longitud de onda, como se logra apreciar en la Figura 2.1. [32]. Todos los procesos se realizan en el medio óptico, sin necesidad de realizar conversiones opto eléctricas y eléctrico ópticas.

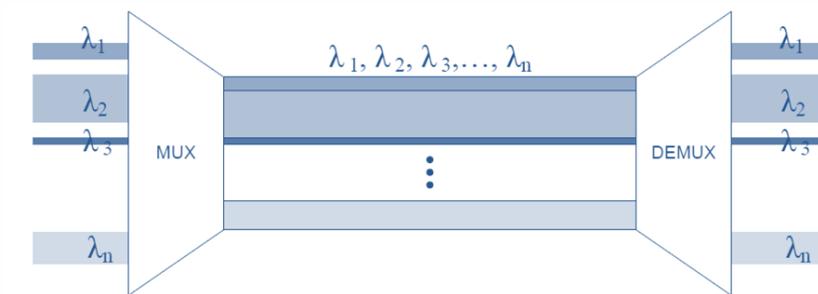


Figura 2.1. Sistema WDM. Adaptada de [32].

El transmisor WDM está formado por láseres de diferentes longitudes de onda, que son multiplexados, amplificados y transmitidos por el enlace de fibra. En el receptor se encuentra un foto detector, luego la señal recibe el tratamiento inverso al que recibió en el transmisor [33] [34]. El enlace está formado por una secuencia de segmentos (*span*), donde típicamente cada segmento mide entre 80Km y 120Km dependiendo de la atenuación, que tiene cada tipo de fibra óptica utilizada. También se pueden emplear amplificadores o repetidores entre los segmentos para alcanzar mayores distancias.

<sup>3</sup> es una técnica que consiste en dividir mediante filtros el espectro de frecuencias del canal de transmisión y desplazar la señal a transmitir dentro del margen del espectro correspondiente mediante modulaciones, de tal forma que cada usuario tiene posesión exclusiva de su banda de frecuencias (llamadas subcanales).

<sup>4</sup> En este trabajo de grado, los términos Longitud de onda y canal serán tratados indistintamente.

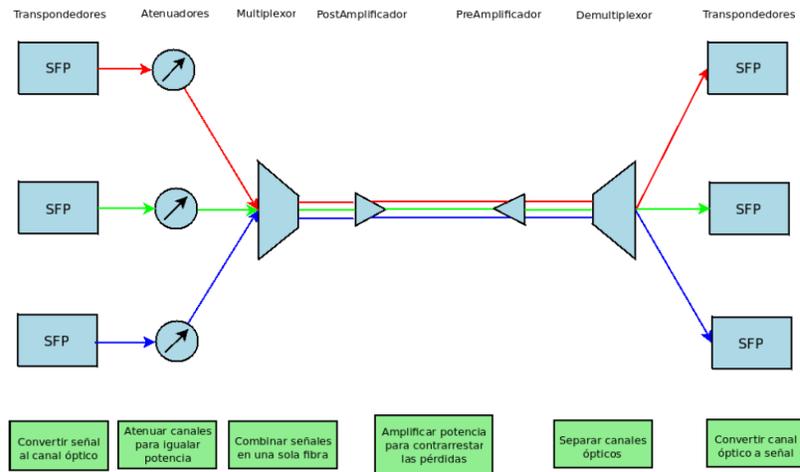


Figura 2.2. Esquema de WDM. Tomada de [32].

Actualmente, los sistemas WDM son clasificados según el tipo de aplicación, de la siguiente manera: Multiplexación por División de Longitudes de Onda Densa (DWDM, *Dense Wavelength Division Multiplexing*) y Multiplexación por División Aproximada de Longitudes de Onda<sup>5</sup> (CWDM, *Coarse Wavelength Division Multiplexing*) [35]. El eficiente uso del ancho de banda de esta tecnología, permite afirmar que DWDM ha logrado, por primera vez, explotar todo el potencial de los enlaces ópticos en cuanto a ancho de banda se refiere [32]. Por otra parte, WDM es la única tecnología que se ajusta a una arquitectura de red completamente óptica en un modo eficiente, escalable y efectivo en costo, en lo relacionado con el aprovechamiento de los recursos.

En la Tabla 2.1. se hace la clasificación conforme a parámetros sugeridos por los estándares de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunications Union*) ITU-T G.694.1 y G.694.2 [36].

<sup>5</sup> Definición según la norma ITU G.694.1 y G.694.2.

Tabla 2.1. Parámetros en Redes CWDM y DWDM

CARACTERÍSTICAS	CWDM	DWDM MAN/WAN	DWDM Largo Alcance
Espaciamiento de los Canales	20nm (2500GHz)	0.8nm (100GHz)	0.4nm (50GHz)
Ventanas <sup>6</sup> Utilizadas	O, E, S, C, L	C, L	C, L, S
Canales por Fibra	4 -16	32 – 80	80 – 160
Capacidad por Canal	2.5Gb/s	10Gb/s	10 - 40Gb/s
Distancias Típicas	Hasta 80Km	Cientos de Km	Miles de Km
Costos	Bajo	Medio	Alto

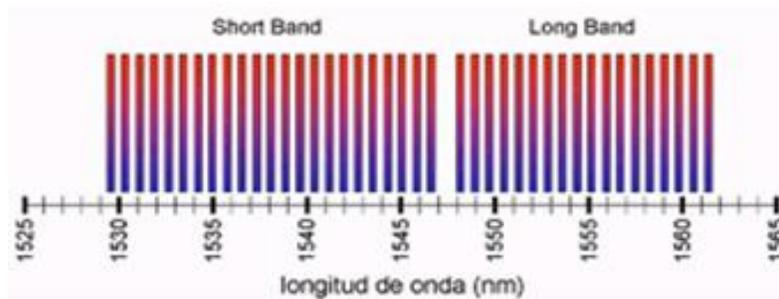


Figura 2.3. Distribución de los canales DWDM en el Espectro Óptico. Tomada de [34].

Para DWDM, la ITU en su recomendación G.694.1 define la utilización de las ventanas desde los 1525nm a los 1565nm, así como espaciamientos típicos entre canales de 0.4nm (50GHz), 0.8nm (100GHz) y 1.6nm (200GHz) con velocidades de transmisión de datos del orden de los 2.5Gb/s a los 10Gb/s [34] y opera sobre las ventanas C y L.

Algunas de las ventajas de DWDM es la de aprovechar al máximo la capacidad disponible en el sistema, disponer de distancias máximas en los enlaces mediante la implementación de Amplificadores de Fibra Dopados con Erblio (EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifier*) y el bajo incremento en el costo debido a la implementación de nuevos canales. Sin embargo, no es una solución costo-eficiente para un número reducido de canales [37]. En la Figura 2.4. Se compara la utilización del espectro DWDM con respecto a CWDM [34] mientras que en la Figura 2.5., se aprecia comparativamente el espaciamiento para DWDM y CWDM.

<sup>6</sup> Las ventanas de transmisión son longitudes de onda con una mínima atenuación, ideales para la transmisión de información.

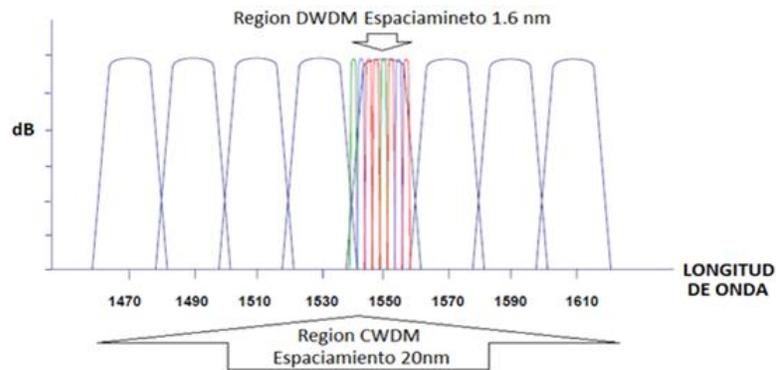


Figura 2.4. Comparación del espectro de CWDM vs DWDM. Tomada de [38].

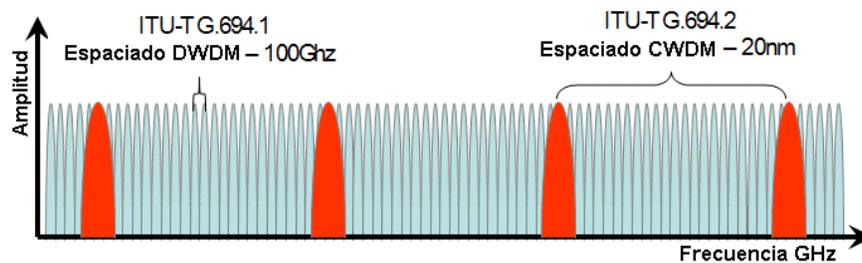


Figura 2.5. Espaciamento entre canales para DWDM y CWDM. Tomada de [39].

## 2.2. Sistemas de Conmutación Óptica

La conmutación, realiza el proceso de conectividad y entrega de la información a través de la red, haciendo un uso eficiente de los recursos; este proceso se puede realizar de forma eléctrica y de forma óptica. A nivel eléctrico la conmutación es el proceso causante de introducir el mayor retardo en una red, debido al procesamiento necesario para el envío de la información y al tráfico de la red [40].

Luego de analizar la evolución de las redes ópticas, se pone de manifiesto la importancia de llevar este proceso al dominio óptico. La creciente demanda de ancho de banda, requiere disponer de redes de transporte que soporten tráfico agregado<sup>7</sup> por encima de los Gigabits y los Terabits por segundo, lo cual posibilita tener diferentes servicios en una única infraestructura.

Las redes ópticas de última generación son aquellas donde los enlaces de transmisión son de FO, la conmutación se hace de forma óptica y en general se operan en forma

<sup>7</sup> Suma de tráficos de usuarios finales.

completamente óptica, su arquitectura se diseña para ser explotada con estas características [41]. Ver anexo A.

En las redes ópticas se presentan tres tipos de conmutación: Conmutación Óptica de Circuitos (OCS, *Optical Circuit Switching*)<sup>8</sup>, Conmutación Óptica de Paquetes (OPS, *Optical Packet Switching*)<sup>9</sup> y OBS la cual es la utilizada en este trabajo de grado. OCS establece canales de comunicación entre el origen y destino, conocidos como caminos ópticos, por ende, OCS está orientada a conexión y asocia una longitud de onda a cada conexión entre el origen y destino. También es posible utilizar diferentes longitudes de onda en el trayecto mediante la utilización de matrices de conmutación OXC, esto se ampliara en la sección 2.3.3.

En OPS los datos se envían junto a la BCP (*Burst Control Packet*), sin establecer un camino de comunicación, al analizar la BCP para determinar la salida por la que se tiene que enviar el paquete, este se necesita almacenar en cada nodo intermedio, ocasionando inconvenientes. Por otro lado OBS el paquete de control es enviado por un camino diferente al que se envían los datos y con un tiempo de separación para que el paquete BCP tenga la posibilidad de configurar el nodo correspondiente y establecer el camino. Se abordara OBS, como un modelo híbrido entre OCS y OPS, mejorando la baja flexibilidad, eficiencia y la falta de tecnología necesaria para construir un nodo completamente funcional. Ver tabla comparativa de los sistemas de conmutación. Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Comparación de sistemas de conmutación óptica. [42].

CONMUTACIÓN ÓPTICA (Paradigma)	Ancho de Banda de utilización	Latencia (configuración)	Búfer Óptico	Procesado/Sincronismo Cabecera (por unidad de datos)	Adaptabilidad (tráfico & errores)
Circuito	bajo	alta	no requerido	Bajo	Baja
Paquete/Celda	alto	baja	Requerido	Alto	Alta
Ráfaga	alto	baja	no requerido	Bajo	Alta

<sup>8</sup> Consiste en reservar un camino entre dos nodos de una red, siendo ese camino una longitud de onda dedicada. OCS tiene un bajo nivel de escalabilidad, ya que el número de longitudes de onda que puede transportar una fibra es limitado.

<sup>9</sup> Técnica basada en la conversión inicial de los paquetes electrónicos al dominio óptico para ser transportados por la red óptica sin ningún tipo de conversión entre los extremos. Todas las funciones de red, como el encaminamiento, tendrían que realizarse en el dominio óptico.

## 2.3. Arquitectura Red por Conmutación Óptica de Ráfagas

La estructura de una red OBS, se compone de dos elementos fundamentales: Nodos de Frontera o Borde (*Edge Node*) y Nodos de Núcleo o Centrales (*Core Node*), cada uno con funciones determinadas. Los nodos de borde se dividen en nodos de ingreso y nodos de egreso, en los nodos de ingreso se inicia la transmisión y ensamble de ráfagas; mientras que en los nodos de egreso la comunicación termina y ocurre el desensamble de las ráfagas. Por otra parte, el nodo central consta de una matriz de conmutación óptica, demultiplexores para los canales de cada fibra de entrada, multiplexores a la salida y una unidad de control que procesa los paquetes de control de la ráfaga.

En la Figura 2.6. se observan las implementaciones de funcionalidades de un nodo en la red OBS, el nodo frontera de ingreso es el responsable del ensamble de las ráfagas, enrutamiento, asignación del canal y la sincronización de la ráfaga en la frontera de la red. El nodo central es el encargado de la señalización, sincronización de la ráfaga en el centro de la red y la resolución de contiendas. Por último, el nodo de salida es el encargado del desensamble de las ráfagas y enviar los paquetes a las capas superiores [43].



Figura 2.6. Diagrama de funciones en OBS. Adaptada de [43].

La Figura 2.7. muestra el esquema de una red OBS, en la que distintas longitudes de onda se comparten entre las conexiones. En los nodos de borde, los paquetes que vienen de otras redes cliente, como la red de área local inalámbrica, *Ethernet*, redes punto a punto, entre otras; son agrupados en ráfagas ópticas que se transmiten y conmutan por los nodos centrales a través de la red hasta su destino.

Cada ráfaga tiene asociado un Paquete de Control de Ráfaga (BCP, *Burst Control Packet*) y una carga útil (*payload*), los cuales son transmitidos en longitudes de onda distintas. La carga útil es enviada a un nodo central con un tiempo de retraso, respecto al BCP, el intervalo de tiempo que transcurre entre la transmisión por el nodo de borde del primer bit del paquete de control y la transmisión del primer bit de la carga útil se conoce como tiempo offset. De esta manera, la unidad de control del nodo central dispone del tiempo necesario para el procesamiento de la información de control y el ajuste de la matriz de conmutación óptica del nodo, de modo que a la llegada de la carga útil esta atraviese el nodo sin retardos, evitando así el procesamiento de la información de la carga útil, para que ésta pase de forma transparente a la red OBS.

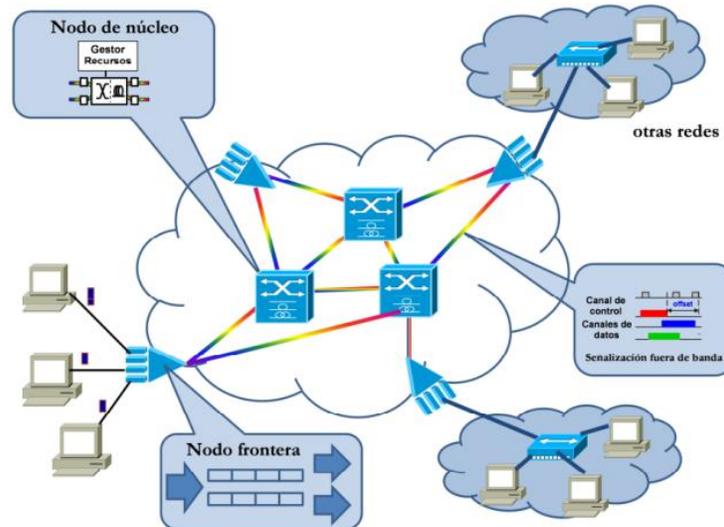


Figura 2.7. Esquema Red OBS. Tomada de [31].

Una vez que la carga útil se inyecta a la red OBS, permanece en el enlace en el dominio óptico hasta su llegada al nodo de borde destino [44].

### 2.3.1. Funcionamiento OBS

La conmutación óptica de ráfagas fue desarrollada especialmente para soportar tráfico intermitente (ráfagas). El nodo de borde, es el encargado de concatenar los paquetes dentro de unidades de transporte llamadas ráfagas, las cuales se enrutan a través de la red de un modo completamente óptico.

Una ráfaga es una agrupación de paquetes que se dirigen a un mismo nodo destino, que cuentan con características de prioridad y calidad comunes. Antes de enviar una ráfaga, es enviado un Paquete de Control de Ráfaga (BCP, *Burst Control Packet*), ver Figura 2.8., que contiene la información para la configuración interna del conmutador óptico, asignando los recursos para el instante de llegada de la ráfaga de datos asociada; este BCP es enviado en una longitud de onda distinta a la utilizada para los datos, y es precedida del tiempo offset, esta es una característica exclusiva de OBS. Este tiempo permite que el BCP termine de reservar los recursos necesarios en cada nodo central, utilizado en el proceso de transmisión de la ráfaga y la configuración de la estructura de los conmutadores. Una vez terminado el tiempo offset se envía la ráfaga, que transita de forma transparente, de extremo a extremo. Suponiendo que el BCP haya tenido éxito en la reserva de recursos. Durante el tiempo de creación del paquete de control y el tiempo offset, la ráfaga es almacenada en el dominio eléctrico en el nodo de borde [45]; de lo contrario, la ráfaga es bloqueada y descartada.

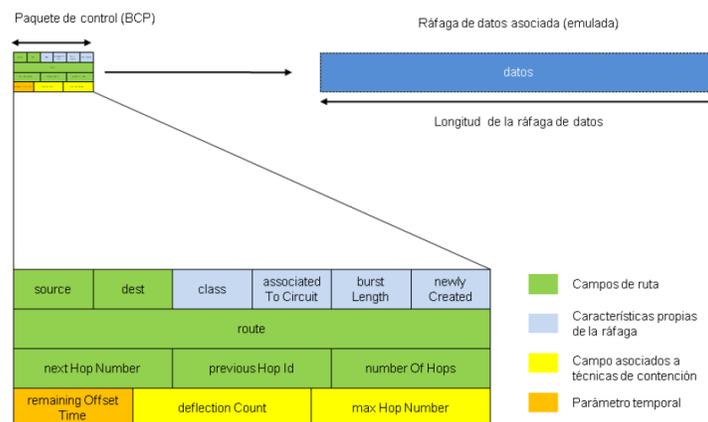


Figura 2.8. Estructura del paquete de control. Tomada de [35]

Cada nodo intermedio, reenvía el BCP al nodo siguiente disminuyendo el tiempo de offset, en consecuencia, el tiempo offset original debe ser calculado de manera que sea mayor o igual a la suma de los tiempos de conmutación en todos los nodos intermedios por los que pasa la ráfaga. Estos tiempos incluyen, las conversiones tanto opto eléctrica, como electro óptica, el procesamiento electrónico del BCP, el tiempo de respuesta de la matriz de conmutación, el número máximo de nodos por el que puede atravesar la ráfaga; considerando la distancia más corta y sin que se presenten bucles

[46]; y el factor de velocidad correspondiente a cada longitud de onda<sup>10</sup>. Este último es de especial importancia, ya que como se mencionó anteriormente tanto el BCP, como la ráfaga, viajan por distintas longitudes de onda, esto implica que viajen a diferentes velocidades a través de la fibra óptica.

Considerando lo mencionado anteriormente, el tiempo offset sin tener en cuenta el factor de velocidad de propagación, está dado por la ecuación (2.1):

$$\text{Offset} = \left( (tc) \times 2 + tp \right) \times N \quad (2.1)$$

tc: tiempo de conversión O – E o E – O.

tp: tiempo de procesamiento del BCP.

N: número de saltos que puede atravesar la ráfaga.

El número de saltos que cursa una ráfaga de origen a destino, está entre un valor mínimo igual a dos, correspondiente a dos nodos adyacentes y un valor máximo de nodos Nmax.

Ahora bien, considerando las variaciones del tiempo offset, que se producen al tener un factor de velocidad diferente entre las longitudes de onda de la fibra óptica a utilizar y asumiendo que el BCP viaja por la longitud de onda que tenga el menor factor de velocidad. El tiempo offset está dado por la ecuación (2.5). Donde la variación del tiempo corresponde al expresado en la ecuación (2.2).

$$\Delta t = \max(\Delta t_i - \Delta t_j) \quad (2.2)$$

Donde el  $\Delta t_j$  corresponde a la variación de tiempo que experimenta el BCP al viajar por la  $\lambda_j$ , dada por la ecuación (2.3):

$$\Delta t_j = \frac{L}{C f V_j} \quad (2.3)$$

---

<sup>10</sup> Corresponde a la relación entre la velocidad de propagación de una señal en la fibra y la velocidad de propagación de la luz en el espacio libre.  $V_f = \frac{V_p}{C}$ ,  $V_p$  = valor real de velocidad de propagación de la fibra,  $C$  = velocidad de propagación de la luz en espacio libre ( $3 \times 10^8$  m/s).

L: longitud de la fibra.

C: velocidad de la luz.

$f_{vj}$ : factor de velocidad de la longitud de onda por la que se transmite el BCP.

El  $\Delta t_i$  corresponde a la variación de tiempo que experimenta la ráfaga, dada por la ecuación (2.4):

$$\Delta t_i = \frac{L}{C f_{Vi}} \quad (2.4)$$

L: longitud de la fibra.

C: velocidad de la luz.

$f_{vi}$ : factor de velocidad de la longitud de onda por la que se transmite la ráfaga de carga útil.

Por último, el valor del tiempo offset, tanto máximo, como mínimo está dado por la ecuación (2.5):

$$\text{Offst} = \text{Offset} + \Delta t \quad (2.5)$$

Offset: tiempo offset máximo o mínimo.

$\Delta t$ : variación de tiempo offset.

La ráfaga no puede ser almacenada en ningún modo intermedio por la falta de memoria óptica; la pérdida de ráfagas es un problema para las redes OBS, especialmente cuando el sistema está mal sincronizado

### 2.3.2. Nodo Borde

El nodo de borde es el encargado de la agregación de paquetes procedentes del exterior a través de las interfaces de red<sup>11</sup> e implementa los protocolos de enlace; clasificación de paquetes, envío al ensamblador adecuado y la generación de la ráfaga. Una vez un paquete llega al nodo, su cabecera es analizada, y de acuerdo con la red

---

<sup>11</sup> Interfaces como la WLAN, Ethernet y PPP.

de destino, se decide a cuál nodo borde de la red OBS debe ser enviado, en la Figura 2.9. se muestra el esquema del nodo de borde.

La estructura del nodo de borde está compuesta de tres unidades principales: la unidad de enrutamiento, el cual convierte las direcciones de capas superiores en direcciones de red OBS; la unidad ensambladora, clasifica y construye ráfagas con paquetes que tienen el mismo nodo de egreso como destino, con características de calidad y prioridad comunes, estas unidades cuentan con un buffer independiente para cada tráfico diferente; y la unidad de temporización-planificación la cual es la encargada de organizar las ráfagas para su envío por medio de un algoritmo. También es función del enrutador de ingreso la creación de paquetes de control y determinación del tiempo offset [47].

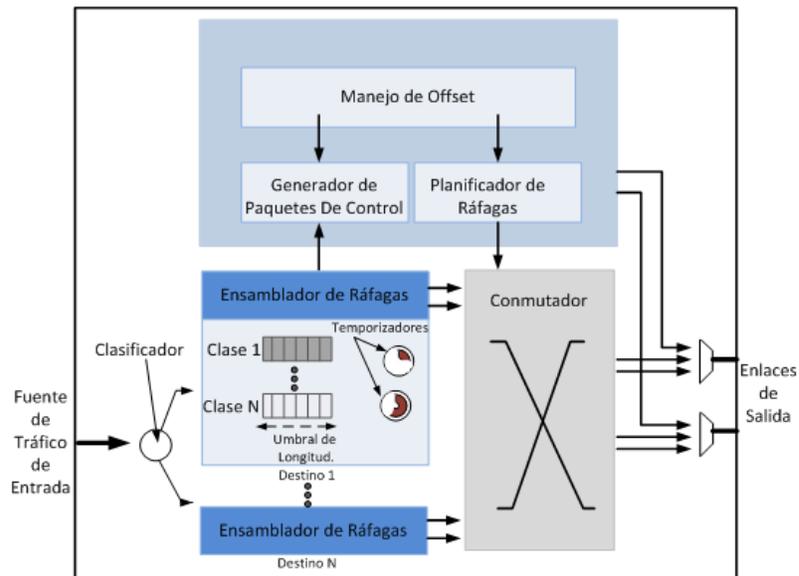


Figura 2.9. Arquitectura Enrutador de Borde. Tonada de [31] [48].

Una vez es clasificado un paquete, es enviado al ensamblador adecuado; en cada nodo borde existe un ensamblador por cada nodo borde destino y este a su vez cuenta con una o más colas para la clasificación de los paquetes según el servicio ofrecido en la red OBS. En el instante que la ráfaga esté lista para ser enviada al nodo borde destino, el camino óptico se configura a medida que el BCP arriba a cada nodo central; se realiza la configuración interna de los recursos durante el intervalo de tiempo que la ráfaga utilice para cruzar por los nodos centrales de forma transparente; el nodo de

borde destino al recibir la ráfaga, por medio de su receptor, extrae los paquetes originales que integraron la ráfaga y los envía a la red destino [49] [50].

### 2.3.3. Nodo Central

Los nodos centrales participan en la configuración del camino óptico y son los encargados de realizar la configuración de la matriz de conmutación<sup>12</sup> del equipo para una vez arribe la ráfaga, salga por el puerto adecuado.

Las funciones de los nodos centrales son: procesar y gestionar la información de control que procede de otros nodos centrales o directamente de los nodos de borde y comprobar que los recursos requeridos para la transmisión de la ráfaga estén disponibles; en caso que de no ser así, si no se dispone de un mecanismo de resolución de contenciones [47], la ráfaga se descarta cuando llega al nodo central, En la Figura 2.10. se aprecia la arquitectura de este enrutador.

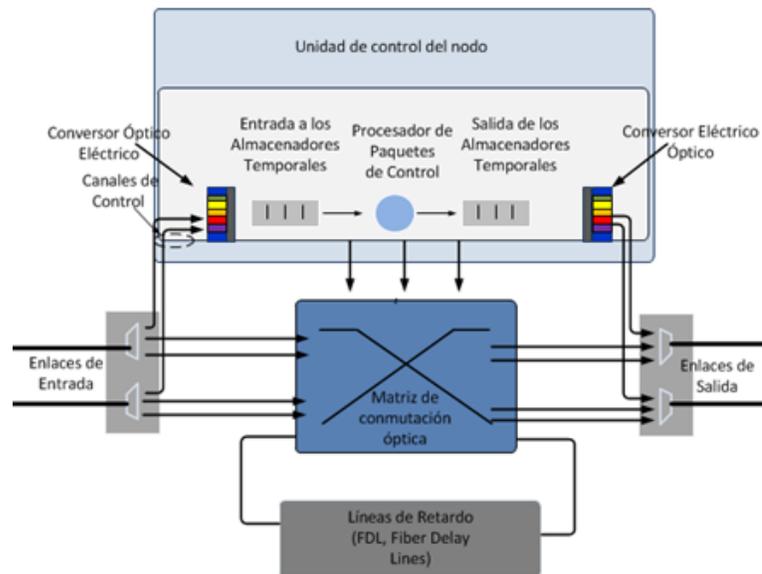


Figura 2.10. Arquitectura Enrutador Central. Tomada de [31] [48]

En OBS los BCP y los datos viajan por diferentes longitudes de onda. Por lo tanto, para enviar los mensajes de señalización una opción es emplear un canal de la fibra. Los BCP son procesados de manera electrónica y reenviados al siguiente nodo en

<sup>12</sup> permite conmutar las ráfagas de una fibra óptica de entrada o de salida, este elemento es reconfigurable y es controlado automáticamente desde la unidad de control.

forma óptica, razón por la cual el nodo debe disponer de convertidores opto-electrónicos y electrónico Ópticos, De igual manera para procesar el mensaje de señalización debe disponer de una unidad de control donde se realiza la planificación de las ráfagas, se resuelven las situaciones de contienda y se crea un nuevo mensaje de señalización para otro nodo si es necesario.

La matriz de conmutación óptica es de gran importancia en el nodo central, permite conmutar las ráfagas de una fibra óptica de entrada o de salida, este elemento es reconfigurable y es controlado automáticamente desde la unidad de control. La velocidad de la matriz de conmutación es clave para la correcta utilización del canal, ya que cuando se cambia la configuración de la matriz de conmutación de un canal no puede llegar dato alguno por el mismo [51].

## 2.4. Protocolos de Reserva de Recursos

Existen varios protocolos de reserva que son empleados en redes OBS, estos protocolos de reserva utilizan un intervalo temporal offset, entre la transmisión de un BCP y la transmisión de la ráfaga. Se utilizan mecanismos para estimar este valor ya que la estimación incorrecta podría suponer pérdida de datos. Entre los esquemas más utilizados para la asignación de recursos en una red, se encuentran: el esquema de Contar y Seguir (TAG, *Tell and Go*), el esquema Longitudes de Onda Totales y Disponibles (TAW, *Total and Available Wavelengths*), el esquema de Solo el Tiempo Suficiente (JET, *Just Enough Time*), el cual es el utilizado por la Red OBS COST239 implementada en este trabajo de grado y el esquema de Tiempo Justo (JIT, *Just in Time*). En la Tabla 2.3 se ve de forma comparativa los esquemas de señalización, en el que se aprecia las ventajas de JET [52] frente a los demás, en cuanto a la aplicación de QoS.

Tabla 2.3. Comparación de mecanismos de reserva. Adaptada de [52]

Mecanismo	JET	Horizonte	JIT
Admisión	Completo	Completo	Completo
Retardo	Variable	Variable	Variable
QoS	Si	No	No

### 2.4.1. JET

JET, es el protocolo de reserva de recursos de mayor uso, para implementación en OBS. Está basado en TAG pero, a diferencia de este, se hace uso de un tiempo offset para separar el BCP del envío de la ráfaga. JET introduce el concepto de Reservación Atrasada (DR, *Delayed Reservation*), el cual permite la reserva de recursos en el instante que la ráfaga llegue al nodo central, no desperdiciando el tiempo de proceso de la BCP [53].

El funcionamiento básico de JET es descrito a continuación y se puede apreciar gráficamente en la Figura 2.11.

1. En el nodo de borde se conforma una ráfaga y su respectivo paquete de control, en él se introduce la información del tiempo de offset previamente determinado y el tamaño de la ráfaga.
2. Cuando el paquete de control alcanza el primer nodo núcleo, se extrae toda la información; el tiempo offset indica al nodo el instante de llegada de la ráfaga, de tal forma que la configuración de la estructura del conmutador y la reserva de recursos, se realice un instante antes de la llegada de la misma.
3. En caso de que la reservación haya sido exitosa, el tiempo offset debe ser actualizado y disminuido, así cuando el paquete de control llegue al siguiente nodo núcleo, se haya tomado en cuenta el tiempo de procesamiento del primer nodo de núcleo. Luego se repite el paso 2.
4. En caso de que no existan recursos en un nodo de núcleo y sea necesario llamar a una resolución de contención, el tiempo offset es actualizado y se aumenta en base a la contención, después el paquete de control con la información actualizada se dirige al próximo nodo y se repite el paso 2.
5. En el caso de no existir recursos necesarios, ni mecanismos de contención disponibles, el BCP será descartado en ese nodo y se interrumpe el proceso de señalización, luego en los nodos posteriores no se reserva recurso alguno.
6. Posteriormente los recursos son liberados luego de que la ráfaga ha dejado el nodo, este instante se determina tomando en cuenta la información de duración de la ráfaga (reservación cerrada). Esto permite que se pueda programar el arribo de otras ráfagas al nodo.

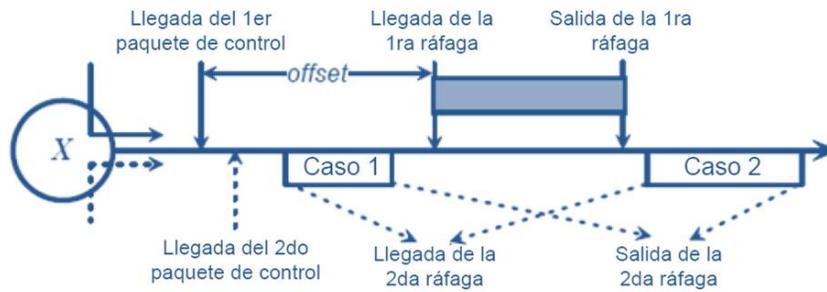


Figura 2.11. Funcionamiento Básico de JET. Tomado de [53].

El modo de operación de JET, presenta una mayor eficiencia en la utilización de los recursos, resultando en una baja pérdida de ráfagas. Una desventaja de este esquema es la utilización de un mayor tiempo de procesamiento en el paquete de control.

### 2.4.2. JIT

En este esquema está basado en el esquema de recursos de confirmación. Las peticiones de transmisión de una ráfaga se envían a un planificador central, el cual decide el instante en que la ráfaga se transmitirá [52] [31].

La expresión JIT hace referencia a que la reservación de recursos se realiza en el instante en que el BCP es procesado. El tiempo de establecimiento es explícito, mientras que el instante de liberación puede ser explícito o implícito, al terminar de transmitir una ráfaga. En primer lugar se transmite el BCP, luego el último nodo transmitirá un Paquete de Confirmación de Reserva (ACK, *Acknowledgement*) en caso de que disponga de recursos disponibles, la ráfaga se transmitirá cuando la confirmación llegue al nodo de origen. Por lo contrario, si en algún nodo no es posible reservar recursos, se enviará un paquete de rechazo de conexión, por lo que la ráfaga no se transmitirá [54].

## 2.5. Algoritmos de Planificación

Cuando una ráfaga llega a un nodo, se debe asignar una longitud de onda y un intervalo de tiempo en el enlace de salida apropiado para que la ráfaga siga su camino hacia el destino. La planificación tiene incidencia tanto en los nodos de borde como en los nodos centrales. Al estudiar la planificación, se considera que los nodos en OBS

soportan conversión total de longitudes de onda, de tal forma que una ráfaga en una longitud de onda en la interfaz de entrada, puede salir por una longitud de onda distinta en la interfaz de salida.

La planificación de los canales en redes OBS difiere en la planificación de paquetes IP, ya que en los enrutadores IP existen memorias que permiten almacenar temporalmente los paquetes, reduciendo la probabilidad de bloqueo de los mismos. Sin embargo en OBS, la ráfaga debe ser enviada directamente al nodo siguiente, sin tiempo de almacenamiento temporal.

El planificador analiza la información contenida en el BCP permitiendo determinar el tiempo de llegada y la duración de la ráfaga correspondiente. De esta manera, es posible determinar si el nodo dispondrá de suficiente tiempo para reconfigurar su matriz de conmutación óptica antes de la llegada de la ráfaga. En caso afirmativo, se calcula el instante inicial de la reserva de recursos y la duración de la ráfaga determina el instante final de la reserva de recursos.

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

### **2.5.1. Horizonte de Planificación**

Se define como el último instante de tiempo en el que la longitud de onda está planificada para ser utilizada. El Último Canal Disponible sin Planificación (LAUC, *Latest Available Unscheduled Channel*) [43] - *Horizon*, es un algoritmo de planificación simple, que contiene un registro del LAUC en cada canal de datos y selecciona como canal de salida aquel que tenga el horizonte de planificación más próximo al instante de llegada de la ráfaga [55] [56], sin superarlo, consiguiendo menores pérdidas de datos.

En la Figura 2.12., se muestra un ejemplo de la planificación de una ráfaga entrante, con 4 longitudes de onda en la interfaz de salida, cada una con una cantidad de ráfagas previamente planificadas.

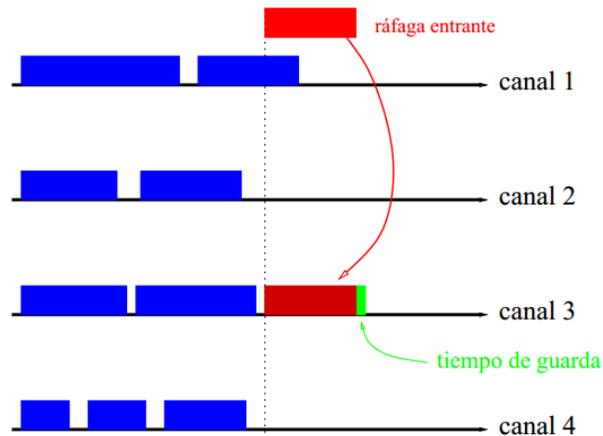


Figura 2.12. Funcionamiento del Algoritmo de planificación Horizonte. Tomada de [54]

En la imagen se aprecia que en la longitud de onda representada con el canal 1 no se puede planificar la ráfaga, ya que supera su horizonte con la planificación de la ráfaga entrante, solapando las ráfagas; por consiguiente, sólo se puede planificar en las longitudes de onda representadas por los canales 2, 3 y 4. Los canales 2 y 4 tienen horizonte de planificación más lejano que el canal 3, con respecto a la llegada de la ráfaga entrante, por lo tanto, planificar la ráfaga en este último canal dejaría un vacío menor en el planificador. La implementación de este algoritmo necesita almacenar el instante final que está planificado en cada longitud de onda, para la próxima planificación, considerando el tiempo de guarda<sup>13</sup>.

## 2.6. Mecanismos de Resolución de Contienda

En los esquemas de señalización unidireccionales o no orientados a conexión, la transmisión de la ráfaga se inicia sin que haya confirmación de la disponibilidad de los recursos solicitados en los nodos intermedios de la red. En consecuencia, existe la posibilidad de que las ráfagas colisionen con otras en los nodos intermedios. La contienda se produce cuando más de una ráfaga de diferentes interfaces de entrada requiere simultáneamente el uso de la misma longitud de onda, teniendo como destino la misma interfaz de salida [57], esta competencia por el uso de los recursos es conocida como contienda (*contention*).

<sup>13</sup> Es un intervalo definido para permitir la configuración de la matriz de conmutación.

En el dominio eléctrico la contienda se soluciona al implementar buffers, pero el uso de estos en OBS es muy limitado o imposible, debido a la inexistencia de memorias de almacenamiento en el dominio óptico, por lo que este problema se afronta desde otra perspectiva. Existen varias técnicas utilizadas en la resolución de contienda en redes OBS [58] [59] [60], entre ellas se describe brevemente los mecanismos utilizados en este trabajo de grado.

### **2.6.1. Eliminación (*dropping*)**

Al no disponer de un mecanismo de resolución de contienda, cuando no es posible realizar la reserva de recursos solicitada por un paquete de control, la ráfaga asociada es descartada [60].

### **2.6.2. Conversión de Longitud de Onda o Desvío por Conversión de Longitud de Onda (*deflection*)**

Al utilizar la conversión de longitudes de onda como mecanismo de contienda en una red OBS, no se presentan restricciones de continuidad en los extremos de una comunicación. Este mecanismo de contienda consiste en que cualquier longitud de onda de entrada se puede convertir a cualquier longitud de onda de salida [61]. Para esto se requiere de conversores de longitud de onda en los nodos, lo que conlleva a que su implementación incremente el costo global de la red, pero con el beneficio de reducir considerablemente la pérdida de paquetes en una red OBS [59] [60].

## **2.7. Red COST239 OBS/DWDM**

La COST, como se mencionó en la sección 1.1. está a cargo de la Comisión Europea, esta red, promueve la cooperación en investigación y desarrollo entre la industria, las universidades y centros de investigación en las principales ciudades de Europa [22] [62].

COST239, es una red óptica de transmisión de ultra alta capacidad, se ha usado para estudiar la viabilidad de una red todo-óptica<sup>14</sup>. Esta red consta de once nodos de red OBS (ver sección 2.3.) localizados en varias de las principales ciudades europeas, de manera que se transporta todo el tráfico internacional entre los principales centros de Europa [23] [22] [24]. Cada nodo soporta tanto el nuevo tráfico de entrada, como el tráfico de tránsito implícito de la red, se compone de un enrutador de núcleo y un enrutador de borde como se muestra en la Figura 2.13.

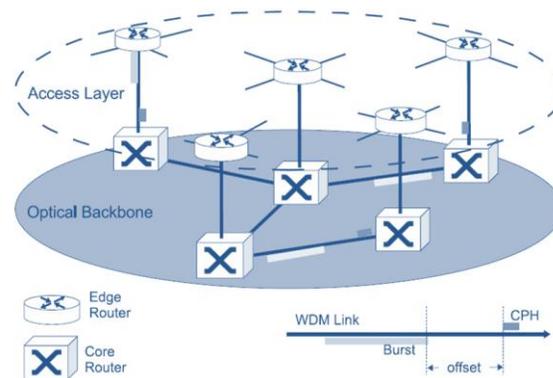


Figura 2.13. Vista simplificada de la arquitectura de la red OBS. Tomada de [23]

La red propuesta abarca una gran área geográfica, con un número relativamente pequeño de nodos. Actualmente se lleva a cabo trabajo de investigación teniendo en cuenta las especificaciones de la red, como lo es la alta capacidad de transmisión, rendimiento de la red y la rentabilidad de la tecnología a aplicarse [22]. Varias cuestiones han sido investigadas; incluyendo la evaluación de los modelos de tráfico para la demanda a medio y largo plazo; la estimación de los requerimientos de capacidad de enlace; el diseño de topología [63] para cumplir con los requisitos de disponibilidad, como la fiabilidad y el bloqueo; evaluación de requisitos de transmisión, limitaciones y evaluación del número de longitudes de onda [22].

La Red Óptica Europea COST239 (ver Figura 2.14.), con una topología irregular, interconecta once ciudades europeas con veintiséis (26) enlaces bidireccionales, cada enlace está conformado por 16 longitudes de onda, a 10 Gbit /s de capacidad por

<sup>14</sup> Una red denominada todo-óptica se refiere a una red en la que no se da conversión opto-eléctrica o electro-óptica, esto toma lugar tanto en el transmisor como en la conmutación que se lleva a cabo en el dominio óptico.

longitud de onda y un esquema de señalización JET, con distancias entre ciudades de 173,07 km a 958,78 km.

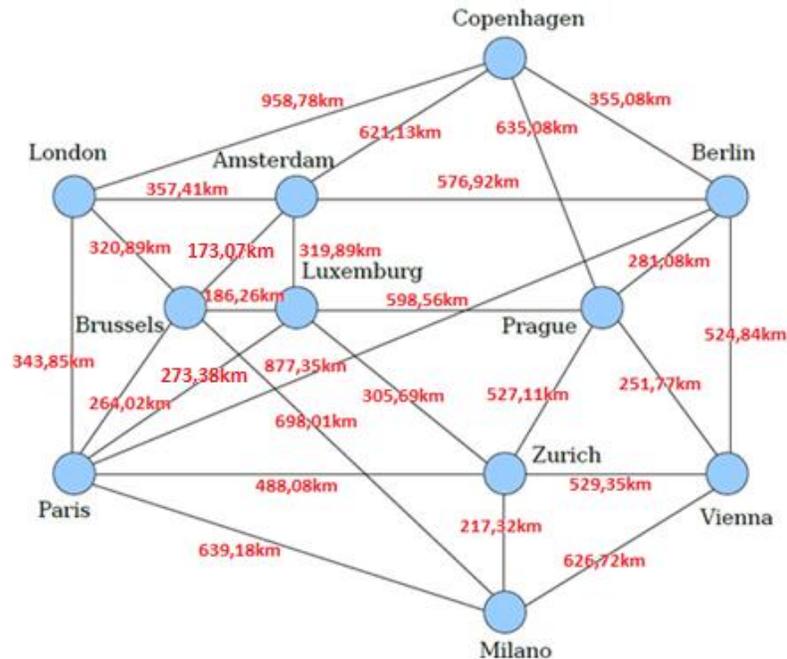


Figura 2.14. Red COST239. Adaptada de [24]

## 2.8. RWA en WDM/OBS

El Enrutamiento y Asignación de Longitudes de Onda es el problema fundamental en redes ópticas WDM. El funcionamiento de una red no solo depende de los recursos físicos, sino también de cómo es controlada. El objetivo de un algoritmo RWA es alcanzar en lo posible, el mejor funcionamiento según los límites de las condiciones físicas. El problema RWA puede ser resuelto de numerosas formas, sin embargo, pueden ser clasificadas bajo una de estas dos versiones: RWA estático [64], por el cual los requerimientos de tráfico son conocidos de antemano, es decir, las demandas son del tipo “*Offline*” y RWA dinámico [65], en el cual una secuencia de peticiones de caminos ópticos o “*lightpaths*” llegan de manera aleatoria, es decir, las demandas son del tipo “*online*”. El problema RWA estático surge naturalmente en el diseño y en la fase de planificación de la arquitectura de la red óptica, mientras que el problema RWA dinámico se encuentra durante la fase de operación en tiempo real de la red e incluye la provisión dinámica de caminos ópticos [10].

Una vez conocidas las demandas de tráfico, para establecer las conexiones ópticas, se debe encontrar las rutas a través de la topología física de la red, lo cual se conoce como enrutamiento. Además, es necesario asignar las longitudes de onda para definir los caminos ópticos, lo que conlleva a resolver el problema RWA.

El objetivo es maximizar el rendimiento por asignación óptima de rutas y longitudes de onda para un patrón de tráfico dado [22]. Las medidas de funcionamiento en una red óptica generalmente pertenecen a una de estas categorías:

- 1) Número de longitudes de onda requeridas.
- 2) Probabilidad de bloqueo de conexión, definida como el cociente entre el número de conexiones bloqueadas y el número total de intentos de conexión.
- 3) Número de recursos de fibra manejados en los nodos enrutadores (o costo de fibra), es decir, el número de puertos que puede manejar el nodo.

Resolver el problema RWA no es trivial. Es un problema combinatorio conocido como NP completo<sup>15</sup> [22] [10] [11]. Por otra parte, los problemas de Enrutamiento y Asignación de Longitud de Onda están unidos. Aun cuando es posible dividir el problema RWA en dos subproblemas: Enrutamiento y Asignación de Longitudes de Onda, cada problema, es a su vez, NP completo, (ver Anexo A.4), y puede dividirse a su vez en dos funciones:

- 1) Búsqueda.
- 2) Selección.

El problema de enrutamiento se resuelve por técnicas basadas en algoritmos del camino más corto. La asignación de longitud de onda se determina por técnicas de coloreado de grafos para las rutas seleccionadas [10]. Para los algoritmos donde se asume un patrón de tráfico estático, el objetivo es minimizar el número de longitudes de onda para establecer un cierto número de conexiones, o maximizar el número de estas para un número dado de longitudes de onda disponibles. Por otra parte, para los algoritmos empleados con tráfico dinámico, el objetivo es minimizar la probabilidad de bloqueo de conexión. Es imperativo que estos algoritmos sean simples y rápidos para

---

<sup>15</sup> Aquel problema que no ha podido ser resuelto de manera exacta por medio de algoritmos deterministas eficientes, pero que puede ser resueltos por algoritmos no deterministas.

que la atención de las peticiones de conexión sea tan rápida como sea posible, en este trabajo de grado se implementará considerando el caso de tráfico dinámico.

El ancho de banda disponible en un camino óptico se asigna al establecer una conexión y se mantiene durante su duración, en este tiempo la longitud de onda correspondiente no puede ser asignada a otra conexión. Cuando esta se termina, el camino óptico asociado se libera y queda disponible.

Para establecer cualquier camino óptico, normalmente se requiere que la misma longitud de onda sea asignada en todos los enlaces de ruta. Esta condición se conoce como condición de continuidad de la longitud de onda y las redes enrutadas por longitudes de onda con esta condición son denominadas redes continuas en longitudes de onda, en las cuales se bloquea la transmisión solo cuando no hay capacidad a lo largo de los enlaces en la ruta asignada a la conexión. Puede ocurrir que las longitudes de onda disponibles en los dos enlaces son diferentes y en ese caso, presenta bloqueo [10].

## 2.9. Algoritmo de Dijkstra

Previo a hablar sobre el algoritmo Dijkstra, se debe mencionar que este algoritmo hace parte de los grafos ponderados (Ver Anexo A.7). Un grafo es una estructura matemática que consta de nodos y conexiones llamadas aristas, estas se encuentran conectadas en sus dos extremos a nodos o posiblemente al mismo nodo en los dos extremos. Esta teoría se ajusta al funcionamiento de los nodos sobre la red COST239, se abordará con el fin de dar solución a la problemática de RWA estudiada en este trabajo de grado.

Muchos problemas de compleja resolución, son representados en forma de grafo para luego ser resueltos usando algoritmos de búsqueda y manipulación estándar sobre grafos, ya que la representación de los resultados son perfectamente comprensibles, incluso para personas con poco conocimiento en matemáticas, permite una presentación visual clara de muchos problemas que necesitan otro tipo de soluciones [66], para una mayor profundización en el tema (ver Anexo A).

El algoritmo Dijkstra básicamente permite determinar la ruta más corta que une los nodos de origen y destino de un grafo. Utiliza un tipo de estructuras de colas llamado cola de prioridad.

El funcionamiento del algoritmo comienza marcando todos los nodos como no utilizados, asignándolos con distancias de valor infinito relativo. Se parte de un nodo inicial conocido visitando sus nodos adyacentes, como Dijkstra es una técnica voraz [67] [68], para que un camino sea óptimo utiliza el principio de que todos los caminos contenidos deben ser óptimos, luego entre todos los vértices adyacentes se busca el que se encuentre más cerca al nodo de origen, el cual es tomado como punto intermedio y se evalúa si se puede llegar más rápido desde este nodo a los demás. Después se escoge al siguiente más cercano (con distancias actualizadas) y se repite el proceso. Esto se realiza hasta que el nodo no utilizado más cercano sea el nodo destino.

Este algoritmo es utilizado en redes OBS como la estudiada en este proyecto de grado, se le asigna un costo (distancia) y de esta manera algunos protocolos lo utilizan para encontrar la ruta más corta.

## 2.10. Teoría de Enjambres

Un enjambre es una agrupación importante de animales, cosas o personas de una misma especie que tienen un objetivo común; de igual manera, se pueden encontrar enjambres conformados por especies de animales diferentes, pero con semejanza celular o de tamaño entre los individuos. Los enjambres más conocidos son los cardúmenes de peces, las bandadas de pájaros, las colonias de bacterias y los enjambres de insectos como hormigas, termitas y abejas.

Los objetivos más frecuentes para la conformación de enjambres son la búsqueda de comida o pareja, la protección ante actividad predatoria y el seguimiento de rutas migratorias. Aun cuando los individuos del enjambre no son inteligentes, las interacciones locales de estos permiten al enjambre cumplir con su objetivo de manera inteligente, beneficiando a todos los individuos en una actividad que no pueden hacer por sí solos o cuya realización demandaría un gran esfuerzo individual (ver Figura 2.15.).



Figura 2.15. Mapa Conceptual Parcial de Teoría de Enjambres. Tomada de [12].

Una de las particularidades encontradas en los estudios biológicos de los enjambres, es que su comportamiento se basa en el cumplimiento de reglas simples. Según algunos modelos de adaptación cultural, el comportamiento de un individuo en un enjambre sigue tres principios: evaluar, comparar e imitar. Así, los individuos son capaces de modificar su opinión, considerando la de mayor éxito, formando así un conjunto de individuos con opiniones muy relacionadas que guía el enjambre a su objetivo. Estos tres principios son la base de las reglas simples generales que siguen la mayoría de los enjambres [69] [70].

Ciertos autores han estudiado y adaptado enfoques de enjambre basado en el problema de enrutamiento, según Dorigo, el algoritmo AntNet es distribuido y adaptativo, aplicando el algoritmo de enrutamiento basado en el método de vector-distancia. Es un caso especial del algoritmo ACO sobre la base de hormigas artificiales y deposición de las feromonas, es un ejemplo representativo y muestra todas las características principales de los enfoques basados en enjambre (los agentes simples, la comunicación indirecta, y el comportamiento de enjambre de forma emergente).

Soluciones eficientes para el problema de diseño de rutas, considerando el trabajo de las hormigas para hallar el camino más corto, también ha sido estudiado por Eric Bonabeau y Christopher Meyer [71].

### 2.10.1. Inteligencia de Enjambres

La inteligencia de enjambres es una tendencia informática inspirada en la teoría de enjambres, que forma parte de la rama de sistemas multiagentes<sup>16</sup> de la inteligencia artificial, surgió gracias a que los informáticos encontraron aspectos interesantes en los enjambres, como los comportamientos sociales descentralizados y auto-organizados, que podrían modelarse para solucionar problemas eficazmente [12], sin recurrir a implementaciones complejas, como se observa en la Figura 2.16.

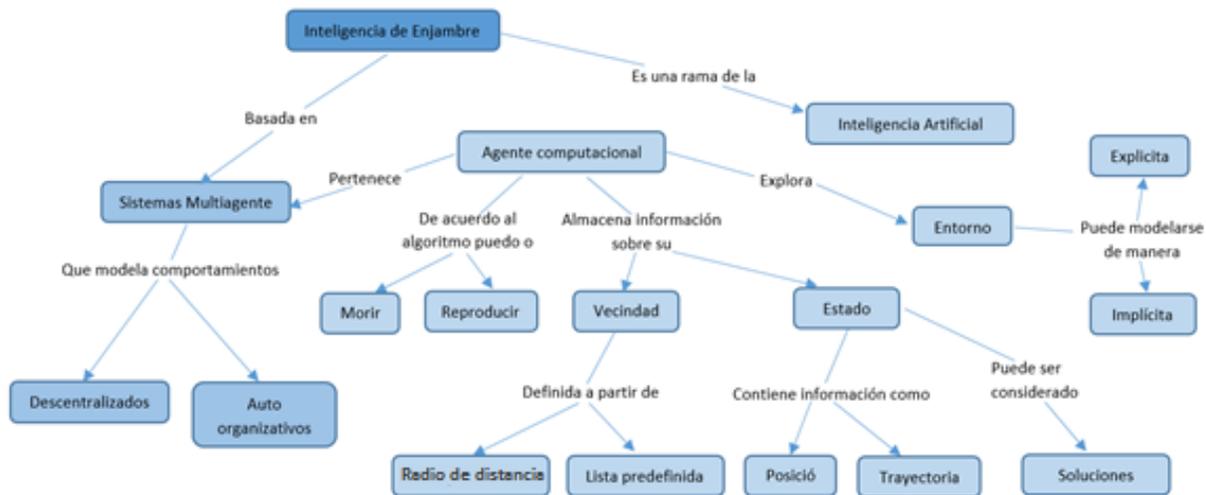


Figura 2.16. Mapa Conceptual Parcial de Inteligencia de Enjambre. Tomada de [12].

Los algoritmos más conocidos que se basan en inteligencia de enjambres son: ACO en el cual se basa este trabajo de grado; enrutamiento basado en el comportamiento de termitas, colmena de abejas artificiales y la optimización por enjambre de partículas.

Todos estos algoritmos tienen un grupo de agentes computacionales autónomos que cumplen unas reglas simples, determinadas por el algoritmo particular. Las reglas están formuladas para que dichos agentes funcionen sin la necesidad de una estructura de control centralizada, de manera que las interacciones locales de cada agente y sus vecinos permitan la emergencia de comportamientos globales inteligentes [72] [12].

<sup>16</sup> Sistema compuesto por múltiples agentes inteligentes que interactúan entre ellos.

## 2.11. Metaheurísticas Basadas en Colonias de Hormigas

### 2.11.1. Colonia de Hormigas Naturales

En los últimos tiempos, la comunidad científica ha realizado una gran cantidad de propuestas de nuevas metaheurísticas (ver anexo A), las cuales prometían resolver un amplio espectro de problemas de optimización tipo NP-Completo. Sin embargo, en la práctica un pequeño grupo de investigaciones se ha consolidado, convirtiéndose en una alternativa en problemas de optimización [73] [74] [75].

Estudios realizados del algoritmo de optimización ACO basado en la simulación del comportamiento social de las hormigas reales en la naturaleza, muestran cómo animales prácticamente ciegos, son capaces de seguir la ruta más corta entre la colonia y una fuente de alimentación, estas se agrupan para conseguir objetivos que no podrían lograr individualmente, las cuales utilizan las feromonas para comunicarse, escogiendo el camino que posea mayor concentración de dicha sustancia [76]. Se ha demostrado que los rastros de feromonas permiten lentamente la optimización, ya que cada agente (hormiga) contribuye en la búsqueda de la mejor solución; con el paso del tiempo el rastro de feromona se evapora.

Se puede concluir que este proceso se caracteriza por una retroalimentación positiva, es decir la probabilidad con la que un agente opta por un camino crece con el número de agentes que previamente hayan elegido el mismo camino [69].

Las características fundamentales de las técnicas ACO son:

- Se utilizan agentes (hormigas artificiales) para construir soluciones en forma incremental. Cada una de las hormigas construye en forma independiente una solución mediante la incorporación de componentes sobre una solución parcial.
- Para la incorporación de componentes se realiza una elección mediante una regla probabilística que tiene en cuenta la experiencia adquirida en etapas anteriores de la búsqueda e información heurística del problema considerado.

- Para incorporar la experiencia adquirida en la construcción de soluciones se utiliza una matriz de feromona, a modo de memoria que almacena el rastro depositado por las hormigas en la construcción de soluciones de buena calidad.

Los algoritmos basados en colonias de hormigas se adaptan perfectamente a los problemas de rutas y su optimización. Los problemas con solución mediante este tipo de algoritmos, tienen en común la determinación del camino mínimo y se caracterizan debido a que el problema presenta un conjunto de restricciones, existe un conjunto finito de elementos, el problema presenta diferentes posibles soluciones, muestra una estructura de conectividad entre los diversos elementos, una solución verifica las restricciones y cada solución presenta un costo asociado.

Estas características se presentan en problemas de resolución combinatoria y una solución es su representación en forma de grafo, donde el conjunto finito de elementos son los nodos del grafo, los estados son las posibles soluciones, las aristas son la estructura de conectividad y cada arista presenta un costo asociado, por ende toda solución presenta un costo global (sumatoria costos parciales).

### **Depósito de Feromonas**

La comunicación de diferentes insectos se realiza por medio de las feromonas, la cual cumple una función de mucha importancia, ya que representa un sistema de comunicación entre individuos de la misma especie sobre el estado fisiológico, reproductivo o social. Estas pueden ser liberadas en forma activa o pasiva determinando ciertas conductas específicas en momentos determinados.

La hormiga en su recorrido realiza el depósito de feromonas en el medio, realizando por ende una marca en su recorrido, esto conlleva al aprovechamiento de la información por el resto del grupo. El movimiento depende de la detección de la feromona, a mayor intensidad la hormiga decide el camino a recorrer, las hormigas prefieren los caminos con un elevado nivel de feromonas. Las cuales detectan el camino más corto debido al depósito continuo, el cual crea un sistema de refuerzo al añadir el individuo una nueva cantidad de feromona sobre la ruta elegida.

Simón Goss realizó un experimento para comprobar el comportamiento real de las hormigas, dispuso dos rutas para llegar al destino para comprobar la evolución en el tiempo [77]

Cuando la hormiga llega a un punto no visitado, elige el camino a seguir de manera aleatoria como se muestra en la Figura 2.17., ya que no tiene ningún tipo de información para la elección del camino.

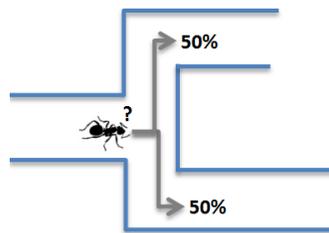


Figura 2.17. Decisión Hormiga Ruta Inicial Adaptada de [77].

La posibilidad de exploración de las hormigas tienen las mismas opciones de elección de camino, ya que el depósito de feromonas en ese instante es nulo.

Una aproximación de la elección del camino más corto de las hormigas a la fuente de alimento se observa en la Figura 2.18., gracias al aporte de la feromona.

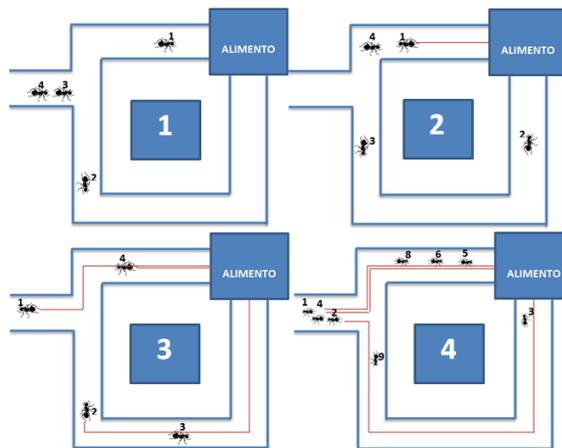


Figura 2.18. Aporte Feromona. Experimento Simón Goss. Adaptada de [77]

Se observa el comportamiento de las hormigas gracias a la evolución del depósito de feromonas en el tiempo, estas escogen el camino más corto el cual tiene el doble de feromonas, originando que la probabilidad de elección del camino más corto a la fuente de alimento sea cada vez mayor. Transcurrido un tiempo las hormigas tienden a escoger el camino con más depósito de feromonas, cabe destacar que existe la

posibilidad de exploración sobre rutas con menor aporte de feromonas, ya que la elección es aleatoria con base a las proporciones de feromonas detectadas en cada ruta.

Simón Goss de estos resultados, desarrollo un modelo de este comportamiento observado. Si una hormiga se sitúa en un cruce después de  $t$  unidades de tiempo desde el comienzo del experimento, conociendo que  $m_1$  hormigas utilizaron la ruta 1 y  $m_2$  la ruta 2, la probabilidad que la hormiga escoja una de las dos rutas es: [77]

$$P_{1(m+1)} = \frac{(m_1 + k)^h}{(m_1 + k)^h + (m_2 + k)^h} \quad (2.6)$$

$$P_{2(m+1)} = 1 - P_{1(m+1)} \quad (2.7)$$

Donde  $k$  y  $h$  son parámetros del modelo que se utilizan para el ajuste de datos del experimento. Cabe resaltar que la feromona en un entorno natural con el paso del tiempo, sufre una evaporación lo cual conlleva a que las hormigas desechen los caminos menos valiosos.

### 2.11.2. Colonia de Hormigas Artificiales

El primer algoritmo de este tipo se le denominó sistema de hormigas (*Ant System*) [78], para la solución del problema de vendedor viajante, siendo este uno de los problemas de optimización combinatoria más conocido, obteniendo resultados no muy importantes, pero causó la curiosidad de un sin número de investigadores los cuales modificaron y aplicaron esta técnica a este problema.

El algoritmo consistía en la comunicación y simulación del movimiento a través del medio de una colonia de hormigas naturales, como características importantes se destacan, tanto las hormigas naturales como artificiales son entes simples que son capaces de trabajar en forma ordenada para alcanzar un objetivo, luego las hormigas naturales su meta es la comida, mientras las hormigas artificiales buscan la solución a un problema de optimización en conjunto.

Gracias a la experiencia en experimentos realizados, las hormigas artificiales presentan una mayor versatilidad de acciones.

La utilización de los grafos para la representación del medio es necesaria para la construcción de un modelo que muestre el ambiente natural de las hormigas y que soporte su comportamiento, la construcción de este modelo tomo como base que las hormigas se mueven de un nodo a otro por medio de aristas, depositando la feromona por las aristas que pasen, la cantidad depende de la solución encontrada, el desplazamiento es de forma aleatoria en función de la feromona, detecta la arista y la distancia al nodo destino, una hormiga solo puede visitar un nodo una sola vez.

Cada hormiga artificial es un elemento probabilístico que construye una solución imitando una hormiga natural, debe recordar el recorrido realizado, la heurística utilizada y la feromona detectada, para saber el camino elegir.

Se sabe que la feromona sufre una evaporación, la cual debe ser tratada por el sistema artificial, limitando el crecimiento de rastros de feromona y que la solución no corresponda a un óptimo local.

## **2.12. Elección de la Herramienta de Simulación OMNeT++**

Es un software que se basa en el lenguaje C++, que es uno de los lenguajes más utilizados en el desarrollo de modelos y redes a nivel de simulación, existen diferentes fuentes de información sobre este, tanto en libros como en Internet. OMNeT++ posee una licencia pública académica que lo hace gratuito para fines educativos y de investigación; se escoge para el desarrollo de este trabajo de grado principalmente por esta característica, frente a otras herramientas de simulación tales como OPNET<sup>17</sup> y NS-2<sup>18</sup>.

OPNET requiere de una licencia anual bastante costosa para poder ser operado, la manera habitual de definir la topología de red es mediante un editor gráfico, que guarda la red en un formato binario propietario que dificulta la posibilidad de generar estas topologías mediante programación<sup>19</sup>. En cambio en OMNeT++ las topologías se

---

<sup>17</sup> <http://www.opnet.com>

<sup>18</sup> <http://nslam.isi.edu/nslam/>

<sup>19</sup> Hay que usar una API específica para C de OPNET.

guardan en ficheros de textos planos que son fáciles de manipular. La principal ventaja de OPNET sobre OMNeT++ es su gran librería de modelos de protocolos, en el que se incluye incluso uno para OBS, mientras que su naturaleza cerrada hace que la programación y la solución de problemas sea compleja [79] [80].

NS-2 es el simulador de red, muy utilizado en el ámbito académico, pero no cuenta con la separación entre *kernel* de simulación y modelos que presenta OMNeT++: la distribución NS-2 contiene los modelos junto a la infraestructura del simulador como una única entidad inseparable. El objetivo de NS-2 es crear un simulador de red, mientras que el objetivo de OMNeT++ es ofrecer una plataforma de simulación.

A NS-2 le faltan muchas herramientas y componentes de infraestructura que OMNeT++ tiene: soporte para modelos jerárquicos, interfaz gráfica de usuario (GUI) de entorno de simulación, separación entre modelos y experimentos, herramientas gráficas de análisis, algunas funcionalidades de simulación como múltiples *streams* RNG, etc. Todo es debido a que NS-2 se ha centrado en desarrollar los modelos de simulación, en vez de la infraestructura de simulación [79] [80].

Hasta ahora, aunque sí se ha propuesto algún modelo de simulación OMNeT++ para OBS [23], no se han hecho públicos. En cambio sí existen modelos OBS públicos para NS-2.

En la Tabla 2.4 se puede observar la comparación entre las diferentes herramientas de simulación.

Tabla 2.4. Parametrización de las herramientas de simulación. Adaptada de [80].

	OPNET	OMNeT++	NS-3	GNS3	NS-2	ESTINET
<b>Uso investigativo</b>	Alto	Alto	Medio	Bajo	Alto	Alto
<b>Tipo de licencia</b>	Comercial	Libre	Libre	Libre/Comercial	Libre	Libre
<b>Curva de aprendizaje</b>	Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto
<b>Plataformas que soporta</b>	Windows, Unix	Windows, Unix	Windows, Unix, Mac	Windows, Mac, Linux	Windows, Unix, Mac	Linux
<b>Interfaz gráfica</b>	Alto	Medio	Medio	Alto	Bajo	Alto
<b>Graficación de resultados</b>	Buena	Aceptable	Aceptable	Limitada	Aceptable	Aceptable
<b>Tecnología de nivel 2 y 3 que soporta</b>	Alto	Alto	Medio	Bajo	Alto	Alto
<b>Tráfico que permite modelar</b>	Alto	Medio	Medio	Nulo	Alto	Alto

Por esto se han realizado los módulos OMNeT++ necesarios, a los que se puede acceder vía web<sup>20</sup>, en el caso de la simulación para este trabajo de grado existe el módulo desarrollado por el Grupo de Redes, Sistemas y Servicios Telemáticos (GRSST) de la Universidad Pública de Navarra, con el que se permite estudiar los nodos Core, Edge, y el enlace de la red OBS con otras redes soportadas por OMNeT++ [33].

OMNeT++ fue creado por András Varga en la Universidad de Tecnología y Ciencias Económicas de Budapest en el año 2003, y como ya se dijo, es un simulador de red gratuito para fines educativos y de investigación, que se basa en eventos de tipo discreto [35].

OMNeT++ no solo es utilizado para simulaciones de redes ópticas, sino que también puede ser utilizado para el estudio de sistemas como [33] [79] :

- Modelado de tráfico en redes de telecomunicaciones.
- Modelado de protocolos.
- Estudio de sistemas basados en colas.
- Evaluación de sistemas multiprocesador y programación distribuida.
- Validación de arquitecturas hardware.
- Evaluación del rendimiento en sistemas software.

OMNeT++ además de las características anteriormente mencionadas puede ser utilizado en muchos sistemas operativos, asegurando que los modelos creados tengan compatibilidad sin importar el sistema operativo en el que está instalado OMNeT++, únicamente hay que reconstruir el archivo de ejecución ya que este varía según sea el caso del sistema operativo que se esté utilizando [35] [79].

En cuanto al funcionamiento de OMNeT++, está basado en un funcionamiento por módulos, los cuales tienen una organización de tipo jerárquica, como se puede apreciar en la Figura 2.19. En la que estos módulos se intercomunican por medio de mensajes. En esta Jerarquía de módulos, el de nivel superior recibe en nombre de módulo de sistema. Este módulo contiene submódulos que a su vez pueden contener otros submódulos, lo que posibilita la creación de una cadena muy larga de módulos

---

<sup>20</sup> <https://www.tlm.unavarra.es/investigacion/proyectos/strong/soft/>

encadenados unos con otros. Los módulos que contienen submódulos son llamados módulos compuestos.

Los módulos de menor jerarquía reciben el nombre de módulos simples, y son los que contienen las implementaciones en C++ hechas por el usuario, utilizando las librerías para simulaciones de OMNeT++ [79] [81]. Los módulos simples pueden ser fácilmente vistos como generadores/receptores de tráfico, como enrutadores (*Routers*), conmutadores (*Switches*) o simplemente como cualquier elemento dentro de la red por el que pase el tráfico [79].

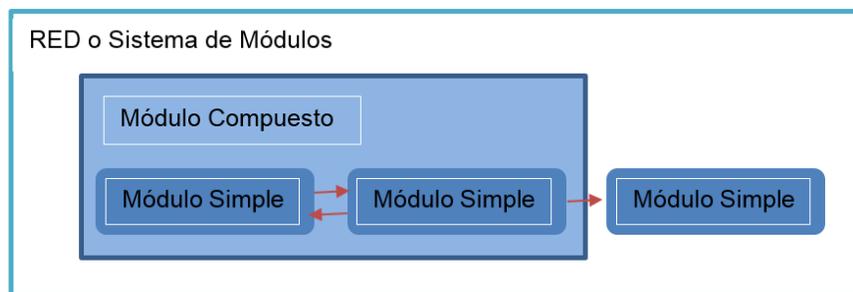


Figura 2.19. Jerarquía De Módulos en OMNeT++.

Los módulos se comunican por medio de mensajes como se mencionó anteriormente, los mensajes son una estructura C++ específica de OMNeT++ que contiene variables para describir la información deseada.

Por ejemplo, mediante un mensaje se puede describir un paquete IP, en el que cada variable de la estructura es un campo de la cabecera IP [79]

Para la definición de la red, OMNeT++ ofrece un lenguaje de alto nivel, el cual recibe el nombre de Editor de Redes (NED, *Network Editor*) [33]. Gracias a este lenguaje se puede establecer la topología de red, la interconexión entre los elementos de la red (módulos), los mensajes a utilizar, los canales y sus parámetros, etc.

OMNeT++ con el propósito de ofrecer facilidades en el desarrollo de las simulaciones de redes, cuenta con una interfaz gráfica, la cual está compuesta por herramientas como:

- Librería de simulación.
- Editor gráfico de redes (*GNED*) que emplea el lenguaje *NED*.

- Compilador para el lenguaje Editor de Redes (*NED, Network Editor*).
- Interfaz de comando por línea (*Cmdenv*) empleado para la ejecución de la simulación.
- Una interfaz gráfica de usuario *GUI*, para la ejecución de la simulación de nombre *Tkenv*.
- Herramienta para la graficación de vectores, conocida como *Plove*.
- Herramienta para la graficación de escalares, conocida como *Scalars*.
- Herramienta para la documentación del código, creación de un archivo *Make*, entre otros elementos [81].

Aunque en los ficheros NED se da al simulador los datos necesarios para poder realizar las simulaciones, OMNeT++ proporciona interfaces gráficas que permiten poder observar la distribución de los elementos en la red, los canales de comunicación entre los elementos y el tránsito de los paquetes por estos canales [35].

Para tener en cuenta aunque las interfaces gráficas (*Tkenv*) permiten una depuración del código en un primer momento, cuando el código está funcionando a la perfección, se recomienda utilizar la simulación por línea de comandos (*Cmdenv*), ya que se realiza en un menor tiempo y permite hacer múltiples simulaciones consecutivas, lo que es muy importante para poder extraer los datos estadísticos necesarios en el análisis de resultados y de funcionamiento de los algoritmos.



## Capítulo 3

# **Modelo de Simulación de la Red COST239 Empleando el Algoritmo de Colonia de Hormigas para la Solución del Problema RWA.**

Este capítulo contiene la descripción y caracterización del modelo de simulación de la red COST239, abordando el problema RWA mediante el uso de los algoritmos de Dijkstra y ACO. En primer lugar se realiza la descripción del modelo MGSR-OBS/DWDM el cual está basado en módulos y sirve como soporte para la realización de diversos modelos de simulación de redes OBS/DWDM. A continuación se procede a describir la biblioteca de módulos creada, la cual se enfoca en la implementación de la solución al problema RWA empleando los algoritmos de Dijkstra y ACO, prestando especial atención a este último como elemento clave para la realización del presente trabajo de grado. Finalmente, se realiza la descripción del modelo de la red COST239, realizado a partir del MGSR-OBS/DWDM, empleando la biblioteca de módulos antes descrita.

La figura 3.1. Muestra la estructura en capas de los modelos de redes basados en MGSR-OBS/DWDM. En ella se observa cómo el núcleo del modelo es la capa base sobre la que se cimienta toda la estructura. Por encima de este, se encuentra la biblioteca de módulos y finalmente, en el nivel superior, se encuentran los modelos específicos de red, los cuales se cimientan sobre la biblioteca de módulos o directamente sobre el núcleo del modelo.



Figura 3.1. Estructura en Capas del MGSR-OBS/DWDM.

### 3.1. El Modelo General para la Simulación de Redes OBS/WDM (MGSR-OBS/DWDM)

Uno de los problemas enfrentados durante el desarrollo del presente trabajo de grado, fue la inexistencia de un modelo de simulación abierto, y extensible para la simulación de redes OBS/DWDM. Aunque existen algunos modelos, desarrollados dentro de entornos académicos, no se encontró ningún modelo que se adaptara de manera natural a las características específicas requeridas para el presente trabajo de grado, sin realizar cambios significativos en su estructura base. Por tal razón, se tomó la decisión de desarrollar un modelo que no sólo fuese aplicable a las características particulares de este trabajo, sino que pudiese ser aplicado en múltiples escenarios con diversas topologías de red, técnicas de enrutamiento, protocolos de planificación y reservación de recursos, entre otros factores, sin modificar su estructura base. Como resultado, se desarrolló el Modelo General para la Simulación de Redes OBS/DWDM (MGSR-OBS/DWDM), el cual llegó a convertirse en el soporte principal para el modelo de simulación de la red COST239 y para abordar el problema RWA empleando los algoritmos de Dijkstra y ACO.

El MGSR-OBS/DWDM consta, en primer lugar, de una base, o núcleo, que contiene las definiciones de sus partes fundamentales, así como de las relaciones y la interacción entre ellas, y los elementos necesarios para unirlas y coordinarlas. Dichas definiciones se proporcionan de forma abstracta y extensible, y se encuentran en uno de los siguientes niveles de abstracción:

- **Definiciones totalmente abstractas:** definen un conjunto de interfaces<sup>21</sup>, cuya funcionalidad debe ser completamente implementada por otros módulos.
- **Definiciones parcialmente abstractas:** contienen una implementación parcial de alguna funcionalidad y una parte abstracta, la cual debe ser implementada por otros módulos.
- **Definiciones funcionales extensibles:** estas definiciones poseen implementaciones completas y pueden ser usadas directamente. Sin embargo, están abiertas a extensiones o a redefiniciones de su comportamiento.

El modelo consta, en segundo lugar, de una biblioteca de módulos. Cada módulo se encarga de implementar una o varias de las funcionalidades abstractas definidas por el núcleo o de extenderlas. Uno de los objetivos del diseño del modelo es que los módulos sean sustituibles e intercambiables, de forma semejante a las piezas de Lego, permitiendo múltiples desarrollos y combinaciones de estos para crear diversos tipos de redes OBS/DWDM. Las siguientes secciones presentan las funcionalidades definidas por el núcleo del sistema, así como los módulos que fueron creados para la realización del presente trabajo de grado.

## 3.2. El Núcleo del MGSR-OBS/DWDM

Contiene las definiciones de los elementos fundamentales que forman una red OBS/DWDM. Estas definiciones están dadas por medio de interfaces y clases polimórficas que representan, de manera abstracta, dichos elementos y permiten realizar múltiples implementaciones de los mismos. Además, el núcleo contiene los objetos encargados de coordinar el funcionamiento de dichos elementos. Los elementos definidos por el núcleo del modelo pueden agruparse en tres categorías:

**Elementos Misceláneos:** incluyen a un conjunto de elementos comunes y variados necesarios para formar la estructura de una red OBS/DWDM. Por lo general estos objetos tienen una funcionalidad simple la cual no requiere de abstracción o extensión

---

<sup>21</sup> Conjunto de operaciones y/o propiedades. En ella se especifica de manera abstracta el comportamiento de un módulo, mas no su implementación. Los módulos que se basen en ellas son los que deben efectuar su implementación.

y, por lo tanto, no forman parte del mecanismo de extensibilidad y modularidad del modelo.

**Modelo de Señalización:** define un conjunto de señales<sup>22</sup> mediante las cuales diversos objetos del modelo permiten realizar notificaciones de cambios de estado o de la realización de determinadas acciones. Uno de sus más importantes usos es la recolección de resultados, permitiendo crear módulos personalizados que se suscriban a cierto conjunto de señales de interés, y a partir de la información recibida de ellas, generen un conjunto de datos. En la descripción de los módulos realizada en las siguientes subsecciones, se incluirá un segmento llamado Señales, para los módulos que puede generar señales, el cual indicará cuáles señales pueden generar dichos módulos.

**Modelo de Direccionamiento:** permite abstraer el concepto de dirección, tanto para las redes de datos externas a la red OBS, como para la propia red OBS, permitiendo definir diversos esquemas de direccionamiento.

**Modelo de Datos:** proporciona una definición abstracta de la estructura de los datos transportados por la red OBS.

**Modelo Funcional:** define los aspectos funcionales de la red OBS, tales como la planificación, el enrutamiento o la conmutación óptica.

**Nodos:** define los nodos que conforman una red OBS/DWDM

**Configuración:** realizada mediante archivos XML. Estos archivos tienen una estructura general fija, sin embargo permiten definir ciertas etiquetas de manera abierta para personalizarlas en relación con las implementaciones del modelo de datos y direccionamiento OBS específicos.

A continuación, se mostrarán con mayor detalle los elementos que conforman cada uno de estos modelos.

---

<sup>22</sup> En OMNeT++ las señales representan eventos que los módulos pueden generar y que pueden ser recibidos por aquellos módulos que se han suscrito a la señal. Este mecanismo desacopla los módulos que generan las señales y los que las reciben, ya que nunca tienen una interacción directa durante el proceso

### 3.2.1. Elementos Misceláneos

Comprenden un conjunto de elementos que sirven como soporte para el funcionamiento de los módulos principales o para unirlos, así como para representar funciones elementales dentro de una red OBS que, normalmente, no requieren ser redefinidas o extendidas. A continuación se procederá a listar los elementos que conforman este grupo. Una descripción más detallada de cada uno de ellos, se encuentra en el Anexo B.1.1.

- Conversor Eléctrico-Óptico/Óptico-Eléctrico (EO/OE).
- Agregador Longitud de Onda (Lambda Adder).
- Desagregador de Longitud de Onda (Lambda Dropper).
- Interfaz Óptica.
- Tabla de Interfaces Ópticas.
- Fibra Óptica.

### 3.2.2. Modelo de Direccionamiento

Este modelo proporciona una abstracción del concepto de dirección, permitiendo a una red OBS/DWDM operar de manera independiente del esquema de direccionamiento utilizado, especialmente en lo relacionado con direccionamiento OBS, permitiendo implementar diferentes esquemas de direccionamiento. Este modelo se encuentra formado por tres interfaces:

- IOBSAddress: interfaz que representa en forma abstracta una dirección OBS. El direccionamiento OBS se realiza de manera similar al direccionamiento IP, asignando direcciones a las interfaces ópticas de los nodos en lugar de a los nodos mismos de forma semejante a como se realiza en redes IP.
- INetworkAddress: interfaz que representa de manera abstracta la dirección de una de datos externa a la red OBS.
- IHostAddress: interfaz que representa una dirección específica de Host dentro de las redes de datos externas a la red OBS.

Para el presente trabajo de grado, se han definido dos módulos encargados de proporcionar una implementación específica del esquema de direccionamiento:

- **NumericOBSAddressing**: proporciona una implementación numérica simple del direccionamiento OBS.
- **SimpleTrafficGeneration**: este módulo define el direccionamiento de las redes de datos externas a la red OBS, implementando las interfaces `INetworkAddress` e `IHostAddress` con un direccionamiento IP versión 4 simple. Este módulo también define el modelo de generación de tráfico, el cual está fuera del alcance del modelo de red OBS desarrollado. Además, implementa el modelo de datos (ver sección 3.2.3. ) en lo relacionado con el modelo del paquete de datos.

### **3.2.3. Modelo de Datos**

Como se mencionó en el capítulo 2, las redes OBS transportan tres tipos de bloques de datos: las ráfagas, los BCP y los paquetes de control. Sin embargo, el formato de trama de estos objetos no es único ni se encuentra totalmente estandarizado. Por tal razón, el modelo de red OBS/DWDM considerado, realiza una representación abstracta de estos objetos, permitiendo distintas implementaciones, que pueden incluir tanto las que emplean segmentación de ráfagas como las que no. Este modelo consta de los siguientes elementos:

- **OBSControlPacket**: paquete de control OBS empleado para señalización.
- **OBSDataBurst**: representa una ráfaga de datos, formada por un grupo de paquetes provenientes de las redes de datos externas a la red OBS.
- **OBSBurstControlPacket**: representa, de manera abstracta, el paquete de control de ráfaga asociado con una ráfaga.
- **DataPacket**: representación abstracta de un paquete proveniente de una red de datos externa.

Para el presente trabajo de grado, se realizó una implementación del modelo de datos OBS simple, sin segmentación de ráfagas. El nombre del módulo que realiza esta implementación es `obsDataNonSegmented`. Además, la implementación del modelo de paquetes de datos, se realizó en el módulo `SimpleTrafficGeneration` (ver sección 3.2.2. )

### 3.2.4. Modelo Funcional

Este modelo abarca los aspectos funcionales de los nodos de una red OBS. A continuación, se nombran los elementos que componen este modelo los cuales son presentados en forma más detallada en el Anexo B.2

- Despachador de Paquetes (Packet Dispatching): recibe los paquetes entrantes, provenientes de las redes de datos externas y los envía a un ensamblador de ráfagas de acuerdo con cierto criterio de clasificación.
- Despachador Inverso de Paquetes (Inverse Packet Dispatching): recibe los paquetes obtenidos al desensamblar las ráfagas en los nodos de destino y los dirige hacia una de las redes de datos externa de destino.
- Ensamblador de Ráfagas (Burst Assembler): agrupa los paquetes en ráfagas y crea sus respectivos paquetes de control.
- Desensamblador de Ráfagas (Burst Disassembler): recibe las ráfagas y las desensambla, obteniendo los paquetes que transportan.
- Planificación (Scheduling): en operación conjunta con la unidad de enrutamiento, realiza la reservación de recursos y la planificación de longitud de onda de salida para cada ráfaga.
- Unidad de Enrutamiento (Routing Unit): determina la mejor ruta para las ráfagas y paquetes de control.
- Unidad de Conmutación (Switching): realiza el proceso de conmutación óptica en los nodos de conmutación y el almacenamiento y envío de las ráfagas en los nodos de Ingreso/Egreso.
- Unidad de Control (Control Unit): encargada de la gestión y asignación de los recursos con ayuda del planificador y la unidad de enrutamiento.

### 3.2.5. Nodos

Estos módulos representan la estructura general de los nodos OBS. Su estructura es fija, sin embargo, la mayor parte de los submódulos que lo conforman están definidos de manera abstracta mediante interfaces de módulos, de manera que puede usarse cualquier implementación concreta de ellos definida en la biblioteca de módulos.

- **Nodo de Ingreso/Egreso (Ingress/Egress Node):** Recibe el tráfico de las redes de datos externas y lo ensambla en ráfagas, las cuales son enviadas al núcleo de la red OBS. También realiza el proceso opuesto, siendo el destino final de las ráfagas, las cuales desensambla, enviando los paquetes que contienen a sus redes de datos de destino.

Como se muestra en la figura 3.2., este nodo está conformado por un clasificador (submódulo dispatcher), un conjunto de ensambladores de ráfagas (vector de submódulos burstifiers), un planificador de ingreso/egreso (submódulo scheduler), una unidad de conmutación de ingreso/egreso (submódulo ingressEgressSwitch), una unidad de control (submódulo controlUnit), un traductor de direcciones (submódulo addressTranslator), un desensamblador de ráfagas (vector de submódulos deburstifiers), y un clasificador inverso (submódulo inverseDispatcher), además de una interface óptica (submódulo opticalInterface) y los conversores eléctrico-óptico (submódulo e2O\_Block) y óptico-eléctricos (submódulo o2E\_Block) requeridos para enviar la información a través de la red óptica y recibirla desde ella. Como se mencionó en las secciones 3.2.1 a la 3.2.3, varios de estos módulos se definen en forma abstracta, permitiendo crear diversos tipos de nodos mediante el uso de distintas implementaciones de cada uno de los submódulos abstractos.

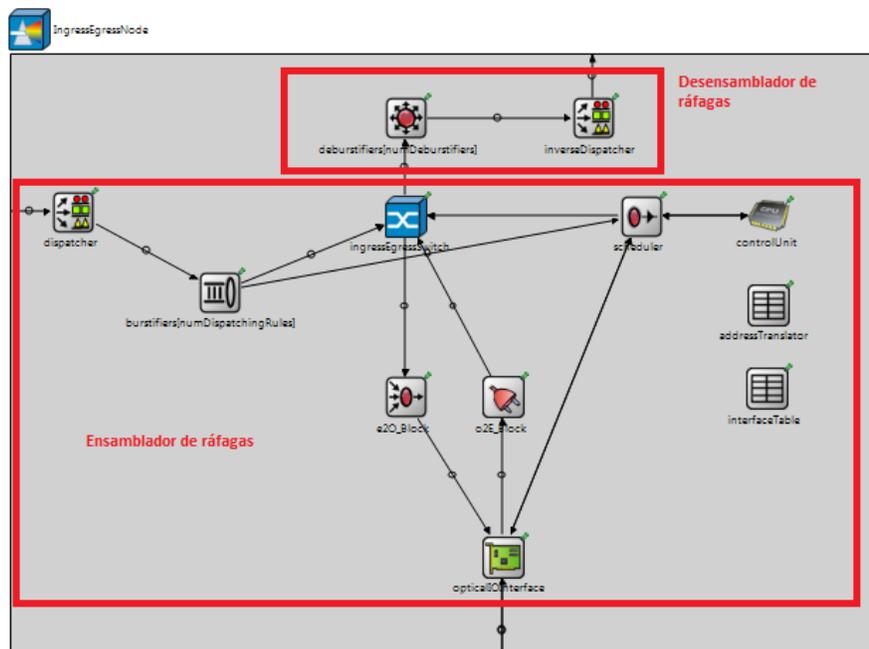


Figura 3.2. Módulo *IngressEgressNode*.

- **Nodo de Conmutación (Switching Node):** Se encarga del enrutamiento de las ráfagas, seleccionando la interface de salida adecuada, de acuerdo con un algoritmo de enrutamiento y reservando los recursos para realizar la conexión necesaria. Como se observa en la figura 3.3., este módulo está formado por un conjunto de interfaces ópticas (vector de submódulos opticalNICs), por una matriz de conmutación óptica (submódulo OXC), un planificador de conmutación (submódulo scheduler), una unidad de enrutamiento (submódulo routingUnit) y una unidad de control (submódulo controlUnit). Las implementaciones de estos módulos definen los algoritmos de reservación de recursos, de planificación, de enrutamiento y el funcionamiento de la matriz de conmutación óptica.

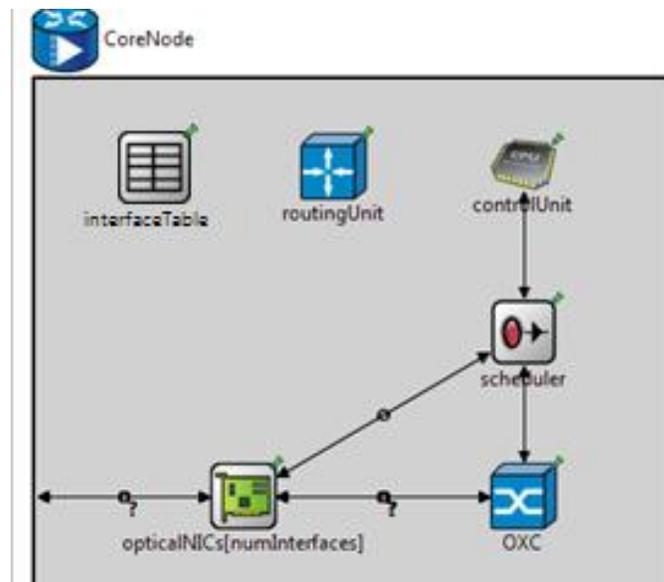


Figura 3.3. Módulo Nodo Switching o Núcleo.

### 3.2.6. Configuración

Esta unidad es abstracta parcialmente implementada, asigna direcciones OBS a las interfaces de red a partir de un archivo XML, crea las tablas de enrutamiento base con rutas directas y estáticas, y crea las tablas que tienen los traductores de direcciones OBS a red. Se deja abierto un conjunto de métodos para consultar direcciones OBS y red.

### 3.3. Biblioteca de Módulos

En la biblioteca de módulos, se encuentran las implementaciones específicas y las extensiones de los módulos definidos de manera abstracta en el núcleo del modelo. Para el presente trabajo de grado, se creó una biblioteca de módulos enfocada a la implementación del problema RWA empleando los algoritmos de Dijkstra y ACO. Estos módulos han sido agrupados en proyectos, donde un proyecto puede tener la implementación de uno o más elementos del modelo. A continuación se presenta un listado de los proyectos creados y de los módulos implementados en cada uno.

- **obsDataNonSegmented**: este proyecto proporciona una implementación del modelo de datos OBS, mediante un modelo de ráfagas no segmentadas. Además, proporciona una implementación de los módulos Ensamblador de Ráfagas y Desensamblador de Ráfagas aplicable para este modelo de datos OBS.
- **obsAddressNumeric**: este módulo proporciona una implementación del modelo de direccionamiento OBS por medio de un direccionamiento numérico simple, en el cual cada dirección OBS es un número entero. También en este proyecto se encuentra una implementación parcial de las funciones relacionadas con la asignación de direcciones OBS a las interfaces ópticas presentes en la red.
- **obsSchedulingHorizontLAUC**: proporciona implementaciones de los módulos planificadores tanto del nodo de Ingreso/Egreso como para el nodo de Conmutación, empleando el algoritmo de planificación Horizon y los protocolos de reservación de recursos JET y JIT, de manera que implementa cuatro tipos de planificadores:
  - **JITHorizontIngressEgressLAUCScheduler**.
  - **JETHorizontIngressEgressLAUCScheduler**.
  - **JITHorizontSwitchingLAUCScheduler**.
  - **JITHorizontSwitchingLAUCScheduler**.
- **obsSwitchingElectrical**: proporciona una implementación para el conmutador eléctrico del nodo de Ingreso/Egreso.
- **obsSwitchingSelective**: proporciona una implementación para la matriz de conmutación óptica sin conversión de longitud de onda.

- `obsSwitchingFullInterchange`: proporciona una implementación para la matriz de conmutación óptica con conversión total de longitud de onda.
- `obsRoutingDijkstra`: contiene una implementación de la unidad de enrutamiento basada en el algoritmo de Dijkstra para los nodos de conmutación, así como una implementación de la unidad de control tanto para los nodos de Ingreso/Egreso.
- `obsRoutingACO`: contiene una implementación de la unidad de enrutamiento de los nodos de conmutación, basada en ACO. Además, contiene una implementación de la unidad de control para los nodos de Ingreso/Egreso, encargada de enviar y recibir hormigas. Este proyecto no realiza ninguna implementación adicional de la unidad de control de los nodos de conmutación. El funcionamiento de ACO como solución al problema RWA, se explicará más detalladamente en la sección 3.6.
- `obsSimpleTraffic`: este proyecto, realiza una implementación del modelo de direccionamiento de las redes de datos, definiendo las direcciones de red de datos y de host por medio de direcciones IP versión 4. Adicionalmente, se realiza la implementación del modelo de datos, mediante un paquete IP. Además, en este proyecto, se realiza una implementación parcial del modelo de configuración, definiendo las funcionalidades asociadas con la asignación y consulta de direcciones de las redes de datos externas a la red OBS. Por otra parte, este proyecto también efectúa el modelo de tráfico, el cual será expuesto con mayor detalle en la sección 3.4.

### 3.4. Implementación del Modelo de tráfico

La implementación del modelo de tráfico se encuentra en el proyecto `obsTrafficSimple`. La generación de tráfico ha sido modelada por medio del concepto de flujo de tráfico. Un flujo de tráfico representa un envío continuo de información, de una red a otra. La generación de la información correspondiente a cada flujo, se modela mediante dos procesos estocásticos: el primero, determina los instantes de tiempo en los cuales los paquetes de información son generados; el segundo, determina el tamaño de dichos paquetes. Los dos procesos, en conjunto, forman un solo proceso cuya media es la tasa de bits promedio del flujo de tráfico.

El modelo de red OBS/WDM generado durante el desarrollo del presente trabajo de grado, permite generar los paquetes en intervalos de tiempo fijos o usar un proceso estocástico de Poisson para modelar los instantes de generación de paquetes. Por otra parte, el tamaño de los paquetes puede ser constante, o modelarse por medio de un proceso estocástico uniforme o gaussiano.

El módulo encargado de la generación y recepción del tráfico en el presente modelo, se denomina *Generator*, (ver Figura 3.4.). Este módulo representa una red de datos, la cual genera una cantidad determinada de flujos de tráfico hacia una o varias redes de destino. Los flujos de tráfico pueden ser caracterizados estadísticamente mediante parámetros como la media o la varianza del proceso estocástico correspondiente.

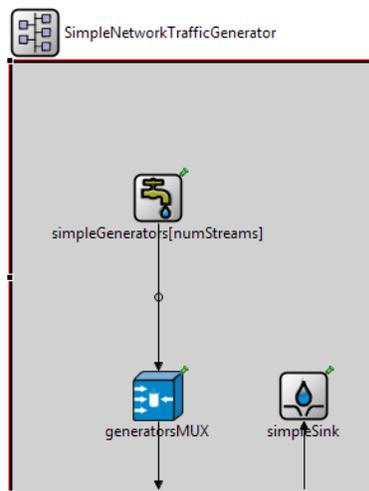


Figura 3.4. Módulo *SimpleNetworkTrafficGenerator*.

Los submódulos que componen el módulo *SimpleNetworkTrafficGenerator*, son el submódulo “fuente” o generador de tráfico simple, un multiplexor y “destino” o sumidero de tráfico simple.

El generador se encarga de crear un flujo de paquetes IPv4, que será transmitido por la red OBS/WDM implementada. La dirección de destino de los paquetes es asignada de manera aleatoria a una de las direcciones de host que pertenecen a la red de destino. La información es creada por los diferentes generadores simples, se agrupa para ser enviada por la misma salida, con la ayuda del multiplexor de tráfico.

El Sumidero de tráfico simple, es el encargado de recibir los paquetes de datos, comprobar si la dirección de destino corresponde a su propia dirección. Tanto el módulo generador simple, como el sumidero generan señales anunciando que han

enviado o recibido un paquete, de modo que un módulo suscrito a dichas señales, puede crear registros estadísticos sobre el envío y recepción de paquetes, tales como el retardo extremo a extremo o la pérdida de paquetes.

### 3.5. La Herramienta Software OBS Network Configurator

Uno de los objetivos que guiaron el desarrollo del MGSR-OBS/DWDM, es la alta configurabilidad. Sin embargo, una mayor configurabilidad requiere un número mayor de parámetros de configuración, especialmente cuando se debe modelar una red con un número de nodos alto. En consecuencia, el proceso de crear y configurar una red puede convertirse en un proceso tedioso y propenso a errores. Por tal razón, para compensar este inconveniente, se consideró útil, e incluso necesario, el desarrollo en paralelo de una herramienta software que permitiera crear y configurar diversas redes basadas en el MGSR-OBS/DWDM. Como resultado de este proceso, fue creada la herramienta *OBS Network Configurator*, la cual fue desarrollada sobre la plataforma .Net de Microsoft, empleando el lenguaje de programación C#<sup>23</sup>. Esta herramienta proporciona una interfaz gráfica amigable al usuario, que le permite crear y configurar una red OBS/DWDM usando el modelo MGSR-OBS/DWDM y que genera todos los archivos necesarios para ejecutar la simulación sobre la plataforma OMNeT++.

Con la creación de esta herramienta, se pretende facilitar y promover el uso académico del MGSR-OBS/DWDM como herramienta de apoyo en el proceso de aprendizaje de redes OBS. La herramienta *OBS Network Configurator* tiene una estructura modular que permite definir nuevos módulos de configuración por cada nuevo módulo que se agregue a la biblioteca de módulos del MGSR-OBS/DWDM, de manera que también se considera la posibilidad de que el desarrollo de la biblioteca de módulos continúe, aumentando así su aplicación en entornos académicos. El anexo C hace una descripción sobre el uso de esta herramienta en la generación de un modelo de simulación de una red OBS/DWDM.

---

<sup>23</sup> Lenguaje de programación orientado a objetos desarrollado y estandarizado por Microsoft, como parte de su plataforma .NET.

## 3.6. Implementación del ACO para la solución del Problema RWA

### 3.6.1. Definiciones

La implementación de ACO realizada en el presente trabajo de grado, se basa en el algoritmo básico de búsqueda de alimento que siguen las hormigas naturales. Para modelarlo, es necesario representar algunos conceptos en términos de elementos del modelo de una red OBS.

**Colonia:** es el punto de partida de las hormigas y corresponde con un nodo de ingreso<sup>24</sup> el cual genera tráfico hacia la red OBS.

**Alimento:** es el destino de las hormigas que salen del nodo “colonia” y corresponde a un nodo de egreso<sup>24</sup> al cual el nodo “colonia” puede enviar tráfico. De acuerdo con esto, un nodo “colonia” puede tener varios nodos “alimento” asociados.

**Hormiga:** es un paquete de control especial, el cual no tiene una ráfaga asociada destinado únicamente a la búsqueda de rutas en la red y cuyo comportamiento imita al de las hormigas naturales. Este paquete incluye un registro de las direcciones OBS de las interfaces por las que ha salido de cada uno de los nodos por los que ha pasado. Esto evita los bucles en el recorrido de la hormiga y le permite regresar a la colonia, una vez que encuentre el alimento, por la misma ruta por la que llegó a él.

**Rastro de Feromonas:** es un valor numérico asociado con cada una de las interfaces ópticas de los nodos de conmutación y que representa un rastro de las hormigas que han pasado encontrado alimento y que han usado esa interfaz como parte de la ruta por la que llegaron a él.

---

<sup>24</sup> Aunque en el presente modelo sólo se han definido nodos de ingreso/egreso, para la descripción del algoritmo de colonia de hormigas resulta conveniente considerar de manera separada su papel como nodo de ingreso y como nodo de egreso.

### 3.6.2. Funcionamiento Básico del Algoritmo

El funcionamiento del algoritmo es el siguiente: cada nodo de ingreso, o nodo “colonia”, envía permanentemente hormigas a buscar nodos “alimento”. Las hormigas van registrando las direcciones OBS de las interfaces ópticas por las que han salido de cada uno de los nodos de conmutación por los que han pasado, de manera que, si encuentran el alimento, sean capaces de regresar por la misma ruta. Las hormigas permanecerán en la red hasta que se cumpla una de las siguientes condiciones:

Encuentren un nodo “alimento”. En este caso, este nodo enviará a la hormiga de regreso a la colonia y esta seguirá la misma ruta por la que llegó al alimento. Durante su recorrido de regreso, cada hormiga actualiza el depósito de feromonas de la interfaz óptica por la que entra a cada nodo de conmutación (que en su recorrido anterior, hacia la fuente de alimento, correspondía a la interface por la cual la hormiga salió del nodo).

El valor del campo TTL de la hormiga llegue a cero, caso en el cual la hormiga es descartada.

Un nodo de conmutación no tenga ninguna ruta disponible para la hormiga debido a que cualquier ruta generaría un bucle. En ese caso, la hormiga también es descartada.

### 3.6.3. Enrutamiento de las Hormigas

El enrutamiento de las hormigas en los nodos de conmutación se realiza por medio del criterio:

- Si no existen feromonas asociadas con ninguna interfaz óptica del nodo, se enruta la hormiga de manera aleatoria por cualquiera de las interfaces del nodo, exceptuando aquella por la que la hormiga entró al nodo o aquellas que se encuentren en la lista de interfaces recorridas por la hormiga.
- Si existen feromonas, se calcula la probabilidad de que la hormiga sea enviada por cada una de las interfaces, mediante la fórmula mostrada en la ecuación (3.1), y de acuerdo con este resultado, se elige aleatoriamente una interfaz de salida.

$$P_i = \frac{f_i}{\sum f_i} \quad (3.1)$$

Donde

$f_i$  = valor de las feromonas en la interfaz de salida  $i$

$P_i$  = Probabilidad de que la hormiga sea enviada a través de la interfaz  $i$

#### 3.6.4. Actualización del valor de las feromonas

El valor de las feromonas puede modificarse debido a uno de los siguientes eventos:

Cuando una hormiga que está regresando a la colonia deposita feromonas. En ese caso, la actualización de feromonas está descrita por la ecuación (3.2)

$$f_i = f_i + \delta \quad (3.2)$$

Donde

$f_i$  = valor de las feromonas en la interfaz  $i$ -ésima, por la cual la hormiga ingresa al nodo

$\delta$  = aporte de feromonas realizado por la hormiga.

Debido al proceso de evaporación natural, el cual disminuye el valor de las feromonas en un factor constante, de acuerdo con la ecuación (3.3)

$$f_i = f_i * \rho \quad (3.3)$$

Donde

$f_i$  = valor de las feromonas en la interfaz  $i$ -ésima, por la cual la hormiga ingresa al nodo

$\rho$  = factor de evaporación.  $0 < \rho < 1$

Cuando una interfaz óptica de salida se bloquea. En este caso, se produce una reducción por un factor constante, semejante a la evaporación, como se muestra en la ecuación (3.4). Esto disminuye la probabilidad de que la ruta bloqueada sea elegida por las hormigas, con lo cual se pretende disminuir el tráfico a través de la interfaz bloqueada.

$$f_i = f_i * \alpha \quad (3.4)$$

Donde

$f_i$  = valor de las feromonas en la interfaz  $i$ -ésima, por la cual la hormiga ingresa al nodo

$\alpha$  = factor de reducción por bloqueo.  $0 < \alpha < 1$

### 3.6.5. Enrutamiento de Ráfagas

Al igual que sucede con otros algoritmos de enrutamiento, el enrutamiento mediante ACO, se realiza por medio de una tabla de rutas común. Cada ruta asocia una dirección de destino OBS con una interfaz óptica de salida para una ráfaga. Sin embargo, la creación de la tabla de enrutamiento está relacionada con la actualización de las feromonas.

Considérese que una hormiga que está regresando a su colonia ingresa a un nodo de conmutación. La hormiga procede del nodo “alimento”  $i$ -ésimo, cuya dirección OBS es  $D_i$  e ingresa al nodo de conmutación a través de la interfaz óptica  $j$ -ésima denominada  $I_j$ . Si se considera una ruta como una pareja dirección OBS destino, interfaz óptica; a dicha hormiga le corresponde una ruta  $(D_i, I_j)$ , es decir una ruta que indica que si una ráfaga se dirige hacia la dirección de destino  $D_i$ , debe ser enrutada por la interfaz óptica  $I_j$ . En caso de que no exista dicha ruta, debe ser creada y en caso contrario, su costo debe ser actualizado. El costo de las rutas debe ser actualizado siempre que haya un cambio en el valor de las feromonas de cualquier interfaz del nodo, ya sea por el depósito de una hormiga, por evaporación o por reducción por bloqueo.

La naturaleza de ACO, contempla la posibilidad de que lleguen a un mismo nodo de conmutación, varias hormigas procedentes del mismo nodo alimento, a través de distintas interfaces ópticas. En estos casos, existirán varias rutas hacia el mismo destino en la tabla de rutas y cada una tendrá un costo que dependerá del valor de feromonas acumulado en su correspondiente interfaz óptica. Considérese un nodo de conmutación en el que existen  $k$  rutas hacia cierta dirección OBS de destino  $D_i$ . La  $j$ -ésima ruta del conjunto corresponde a la pareja  $(D_i, I_j)$  donde  $j = 0, 1, \dots, k - 1$ . El costo de cada ruta está dado por la ecuación (3.5).

$$C_j = \left( 1 - \frac{f_j}{\sum_k f_j} \right) * 100 \quad j = 0, 1, \dots, k - 1 \quad (3.5)$$

Dónde:

$C_j$  = costo de la ruta  $j$ -ésima.

$f_j$  = valor de feromonas de la interfaz  $I_j$

$\sum_k f_j$  = suma de las feromonas de todas las interfaces  $I_j$  que pertenecen a rutas cuya dirección de destino es  $D_i$

El proceso de enrutamiento se realiza eligiendo primero la ruta de menor costo hacia la dirección de destino de la ráfaga. En caso de que no esté disponible, se elige la siguiente con menor costo y, así sucesivamente, hasta que la ráfaga pueda ser planificada o hasta que sea descartada.

### 3.6.6. Implementación

Como se mencionó en la sección 3.3, la implementación de la solución al problema RWA empleando ACO, se efectúa realizando una implementación específica de los siguientes módulos:

- Unidad de control del nodo de ingreso/egreso: este módulo se encarga de crear las hormigas y enviarlas en la búsqueda de alimento, así como de recibir las y reenviarlas hacia su colonia.
  - Unidad de enrutamiento del nodo de conmutación: se encarga del proceso de registro y actualización de feromonas, así como de crear y actualizar las entradas de la tabla de enrutamiento de acuerdo con el comportamiento de las hormigas. En la Figura 3.5. se muestra el funcionamiento básico por medio de un diagrama de secuencia, donde la unidad de control del nodo de borde se encarga de crear dos tipos de hormigas:
    - Hormiga Exploradora: paquete especial sin dirección destino, utilizada para la búsqueda de rutas entre el nodo colonia y el nodo alimento, cuenta con un registro de direcciones de interfaces de salida de los nodos de conmutación, recorridas para llegar al nodo alimento, luego este registro es utilizado para enrutar la hormiga por la ruta que utilizo para llegar a este nodo, actualizando el depósito de feromonas.
    - Hormiga de Mantenimiento: paquete especial con dirección destino, utilizado para reforzar los depósitos de feromonas de las rutas previamente encontradas por la hormiga exploradora.

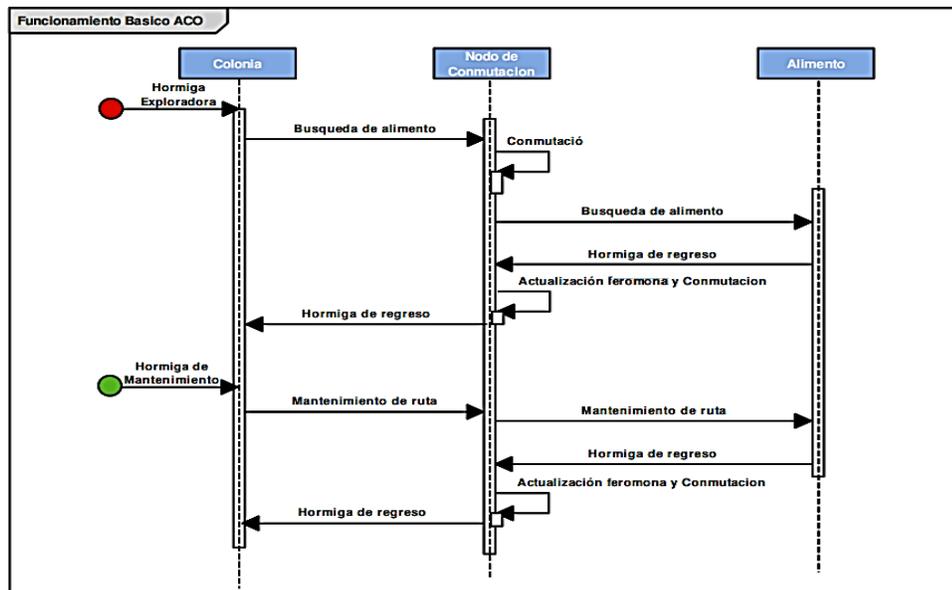


Figura 3.5. Módulo Funcionamiento Básico ACO.

La unidad de control del nodo de borde genera periódicamente hormigas exploradoras para encontrar las rutas entre el nodo colonia y el nodo alimento. Al llegar al nodo de conmutación este se encarga de verificar si tiene una dirección de destino, también verifica si las interfaces asociadas cuentan con un depósito de feromonas para el enrutamiento de no ser así, las hormigas exploradoras son enrutadas de manera aleatoria por una de las interfaces de salida. Al llegar al nodo destino, se asigna la dirección destino y se reenvía la hormiga al nodo alimento por la ruta del registro de interfaces utilizadas, reforzando los depósitos de feromonas.

Al haber presencia de feromonas en los depósitos de cada una de las interfaces se efectúa el enrutamiento con respecto al valor de probabilidad de cada una de las interfaces.

### 3.7. Modelo de la Red Europea COST239

A partir del núcleo y de la biblioteca de módulos MGSR-OBS/DWDM, es posible modelar una red específica. En este caso se realizó una representación de la red europea COST239, abstrayendo cada uno de sus componentes y caracterizando a nivel de simulación mediante la herramienta OMNeT++ el problema RWA. Debido a la gran cantidad de parámetros de configuración y de archivos requeridos para el funcionamiento, se procedió a generar de manera automatizada el modelo para la red

haciendo uso de la herramienta *OBS Network Configurator* creada durante el desarrollo del presente trabajo de grado con el fin de hacer más accesible la utilización del modelo generado. La herramienta *OBS Network Configurator* fue desarrollada sobre la plataforma .Net de Microsoft, haciendo uso del entorno Integrado de Desarrollo (IDE, *Integrated Development Environment*) *SharpDevelop*, empleando el lenguaje C#. Las características de este software para generación de redes OBS se aprecian en el Anexo C.

La red OBS/WDM COST2239 implementada sobre la herramienta OMNeT++ se puede apreciar en la Figura 3.6., en la que se observan los once nodos que la conforman y su respectiva topología.

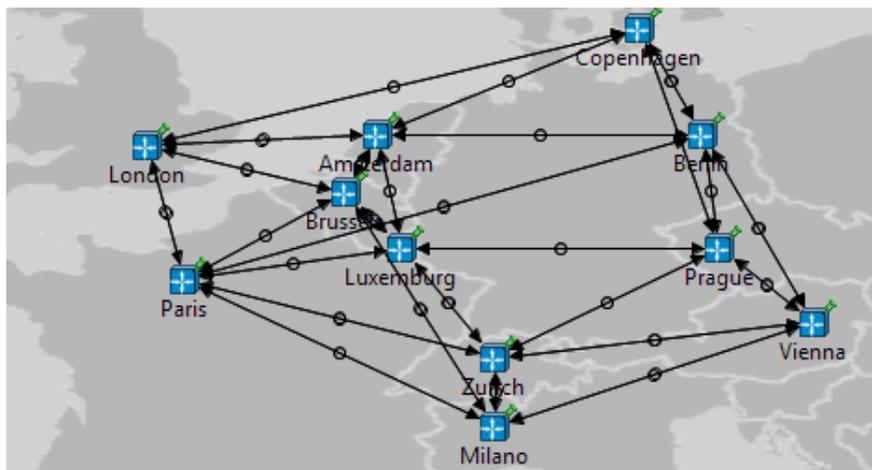


Figura 3.6. Implementación de la Red COST239

Para mejorar la estética de la red, se agruparon varios elementos dentro de un solo bloque llamado *EdgeCoreBlock*, el cual incluye tanto al nodo de borde, como al de núcleo, además el generador de tráfico y las fibras ópticas de salida. Este módulo se observa en la Figura 3.7.

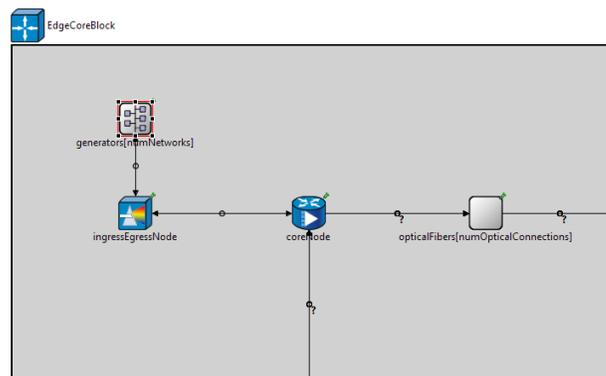


Figura 3.7. Módulo *EdgeCoreBlock*.

Con la ayuda del MGSR OBS/DWDM y la herramienta *OBS Network Configurator* se logró caracterizar la red COST239 y el problema RWA, visto con la abstracción hecha de la red, de cada uno de sus elementos y recursos disponibles. Cabe destacar que estas implementaciones están abiertas a modificaciones y reestructuraciones para posibles nuevas implementaciones, debido a que es el primer modelo desarrollado, el cual puede tomarse como base para la generación de redes OBS; se buscó la modularidad de cada uno de sus componentes, con el fin de dejar abierta esta herramienta a futuras implementaciones, tales como algoritmos de enrutamiento, mecanismos de planificación, matrices de conmutación con conversión de longitud de onda limitada, ráfagas con segmentación, mecanismos de señalización mediante la implementación de las unidades de control, mecanismos de asignación de recursos, mecanismos de resolución de contiendas, QoS, que fácilmente se pueden ajustar y acoplar por medio de la creación de un módulo al modelo existente.

Para facilitar la implementación y caracterización de las redes OBS, se desarrolló una aplicación llamada *OBS Network Configurator* (ver Anexo C) que facilita la configuración de diferentes topologías de red, caracterización de sus elementos y la generación de configuraciones; que al realizarse directamente sobre la herramienta OMNeT++ resulta ser tediosa y engorrosa, por lo que se pueden cometer errores en su configuración. Se recomienda la exploración, utilización y perfeccionamiento de la aplicación para procesos educativos y facilitar la implementación de redes OBS en el ámbito académico.



## Capítulo 4

### Escenarios de Simulación y Pruebas

En este capítulo se describe el escenario de simulación, para el estudio del comportamiento de la red COST239 OBS/DWDM, frente a la problemática RWA, al variar la implementación del algoritmo de enrutamiento dinámico entre Dijkstra y ACO.

Al hablar de un escenario de simulación, se hace referencia a la configuración inicial de las características y parámetros de la simulación. En este caso se caracteriza la red COST239 OBS/DWDM, en la que se configuran parámetros tales como el número de longitudes onda de los enlaces, mecanismo de resolución de contienda y los protocolos de señalización. Ver Tabla 4.1

#### 4.1. Fase 1. Generación del Escenario y Casos de Simulación.

Con base en el análisis realizado de la red COST239 OBS/DWDM definido en los capítulos anteriores. Se establece el escenario y los casos de simulación.

Se procedió hacer el montaje del escenario propuesto, configurando la topología de red COST239 OBS/DWDM, con ayuda de la aplicación *OBS Network Configurator*. Como se muestra en el Anexo C. El resultado de la implementación de red sobre esta aplicación, genera un proyecto, el cual es utilizado sobre la herramienta OMNeT++ con el fin de analizar el funcionamiento y comportamiento de la red.

Posterior a la generación del escenario de simulación, se describieron los casos y sub casos de simulación. Para el estudio del comportamiento de la red COST239 OBS/DWDM, frente a la problemática RWA, al variar el tipo de algoritmo de enrutamiento.

Se generaron los dos escenarios de simulación, que se implementaron en el caso 1 y el caso 2. Pertenecen al estudio de los parámetros globales de la red, tales como el número de longitudes de onda, los mecanismos de resolución de contienda y los protocolos de asignación de recursos. Que ayudan a identificar cuál de los dos protocolos de enrutamiento tiene los mejores resultados frente a RWA.

#### **4.1.1. Caso 1: Red COST239 OBS/DWDM con la Implementación de Dijkstra.**

El algoritmo de enrutamiento dinámico utilizado es Dijkstra, descrito con anterioridad, en la sección 2.9.

#### **4.1.2. Caso 2: Red COST239 OBS/DWDM con la Implementación de ACO.**

El algoritmo de enrutamiento a utilizar es ACO del tipo dinámico, detallado en la sección 2.11.

#### **4.1.3. Sub Casos de Simulación**

##### **Sub caso 1**

Se configuró la red con el protocolo de reserva de recursos (JET) y el mecanismo de resolución de contienda (conversión de longitudes de onda); se varía los valores de longitudes de onda (4, 8, 16) de los enlaces entre los nodos centrales de la red, para observar el efecto que tiene el variar el número de longitudes de onda o los recursos con los que cuentan los enlaces, también apreciar cuál de los algoritmos de enrutamiento tiene un mejor desempeño frente a estas variaciones.

##### **Sub caso 2**

En el Sub caso 2.1, se toma como referencia 16 longitudes de onda, que es el caso que presento mejor desempeño del sub caso1 y también porque es el número de recursos con los que cuentan los enlaces de la red COST239; como protocolo de asignación de recursos JET, se procede a variar el método de resolución de contienda de los enlaces (continuidad de longitud de onda, conversión de longitud de onda),

observando cual es el efecto de implementar un mecanismo de resolución de contiendas en el conmutador de la red.

El Sub caso 2.2, se toma como referencia 16 longitudes de onda y conversión de longitudes de onda como mecanismo de resolución de contienda, se varió el protocolo de asignación de recursos entre (JET, JIT), para ver el efecto que tiene la implementación de estos protocolos.

Tabla 4.1. Escenario y Casos de Simulación

Escenario de Simulación		
Escenario: Se realiza el montaje de la topología de red COST239.		
Casos de simulación		
Caso 1	Caso 2	
Red COST239 OBS/DWDM con la implementación de Dijkstra	Red COST239 OBS/DWDM con la implementación de ACO	
Sub Casos de Simulación		
Sub caso 1	Sub caso 2	
JET, con conversión de longitud de onda y variación de longitudes de onda (4, 8,16).	Con referencia de 16 longitudes de onda	
	Sub Caso 2.1	Sub Caso 2.2
	JET, Con y sin conversión de longitud de onda	Variación: JET y JIT, con conversión de longitud de onda

## 4.2. Fase 2. Identificación de Parámetros de los Escenarios de Simulación del Plan de Pruebas.

Los parámetros configurables que se presentan en los escenarios de simulación, se plasman en la Tabla 4.2. En ella se identifican las variables primarias que afectan directamente los resultados de simulación, así como las variables secundarias que influyen sobre las variables primarias.

En cuanto a simulación, cabe resaltar que por cada nodo de borde existe una red que genera, un flujo de tráfico hacia cada una de las redes destino que hacen parte de la red COST239 OBS/DWDM; si hay N nodos, habrá  $N(N-1)$  flujos. La red COST239 OBS/DWDM implementada en este trabajo de grado tiene un total de 11 nodos, por lo que cuenta con 110 flujos de tráfico.

Cada flujo genera tráfico con un tamaño de paquete promedio de 1000 bytes (8000 bits), con una varianza de tamaño de 500 bytes y una tasa de  $N_p$  paquetes por segundo. La tasa de bits promedio por cada flujo es:

$$R_{bits\ Flujo} = T_p * N_p \quad (4.1)$$

$T_p$ : tamaño promedio de los paquetes en bits.

$N_p$ : tasa de paquetes por segundo.

El tráfico total de la red:

$$R_{Total} = N * (N - 1) * R_{bits\ Flujo} \quad (4.2)$$

Este tráfico se varió 12 veces a nivel de simulación, entre 1,76Gbps a 35,2Gbps, sobre la red COST239 OBS/DWDM, con el fin de apreciar el comportamiento respecto a parámetros, como la probabilidad de bloqueo, porcentaje de pérdida de ráfagas, porcentaje de pérdida de paquetes y retardo punto a punto.

Tabla 4.2. Variables Primarias y Secundarias del Enlace de Comunicación.

Utilizando los algoritmos de enrutamientos dinámicos: Dijkstra o ACO	
Variables Primarias	
Tipo de Multiplexación	WDM
Espaciamiento de Canalización de Lambas	0.8nm
Capacidad por Longitud de Onda	10Gbps
Función de Costo	Número de saltos, Distancia, depósito de feromonas
Modelo de Generación de Paquetes	Tiempo de envío del paquete – Proceso Poisson Paquetes promedio por unidad de tiempo
Modelo del Tamaño del Paquete	Tamaño del paquete - Distribución Gaussiana Tamaño del paquete promedio 1000 kb Varianza del tamaño del paquete 500 kb
Variables Secundarias	
Número de longitudes de onda	4, 8, 16
Protocolo de señalización	JET, JIT
Asignación de longitudes de onda	Continuidad de longitudes de onda Conmutación de longitudes de onda

En la

Tabla 4.3, se define el plan de pruebas de simulación que corresponde a la variación de las variables que influyen en cada prueba establecida, de manera que los resultados obtenidos con la simulación sirvan como criterio para evaluar el desempeño de la red COST239 OBS/DWDM en cuanto a RWA.

Tabla 4.3. Plan de Pruebas de Simulación.

Prueba de simulación	Variables
<b>Simulación del caso 1.y caso 2</b>	Sub caso 1
	Longitudes de onda = (4, 8, 16) $\lambda$
	Protocolo de reserva de recursos JET
	Conversión de longitud de onda
	Sub Caso 2
	16 Longitudes de onda
Protocolo de reserva de recursos: (JET, JIT)	
Sin o con conversión de longitudes de onda.	

Para efectuar la simulación y recolección de datos, se utilizaron 9 equipos de cómputo (portátiles), en los que se instaló como sistema operativo Linux (Ubuntu), la herramienta de simulación OMNeT++ y la aplicación OBS Network Configurator. Se realizaron 20 iteraciones por cada caso de simulación, en la que 1 segundo de simulación correspondió a 4 horas de tiempo real. Las características de los equipos se aprecian en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Descripción de Equipos Usados en la Simulación.

Descripción de equipos de cómputo que se utilizaron para efectuar las pruebas.	
<b>ASUS</b>	
<b>ASUS N56V</b>	Intel CORE i7, RAM 8Gb
<b>ASUS N56V</b>	Intel CORE i7, RAM 8Gb
<b>ASUS A45V</b>	Intel CORE i5, RAM 4Gb
<b>HP</b>	
<b>Pavilion g4-1065 la</b>	Intel CORE i5, RAM 4Gb
<b>LENOVO</b>	
<b>G40-70</b>	Intel CORE i5, RAM 4Gb
<b>COMPAQ</b>	
<b>CQ40</b>	AMD Celeron, RAM 2Gb
<b>CQ45</b>	AMD Visión, RAM 2Gb
<b>TOSHIBA</b>	
<b>UltraBook</b>	Intel CORE i3, RAM 2Gb
<b>SAMSUNG</b>	
<b>300E4A</b>	Intel CORE i5, RAM 4Gb

### 4.3. Fase 3. Ejecución de las Simulaciones

Las configuraciones de la Tabla 4.3 fueron implementadas con la ayuda de la aplicación *OBS Network Configurator*. Esta aplicación genera un proyecto para OMNeT++, listo para ser ejecutado y, como resultado obtener los parámetros del desempeño (probabilidad de

bloqueo, pérdida de paquetes, pérdida de ráfagas, retardo extremo a extremo) respecto al tráfico de la red.

La red COST239 OBS/DWDM implementada se puede apreciar en la Figura 4.1, donde se aprecian los once nodos que la conforman y sus respectivas conexiones.

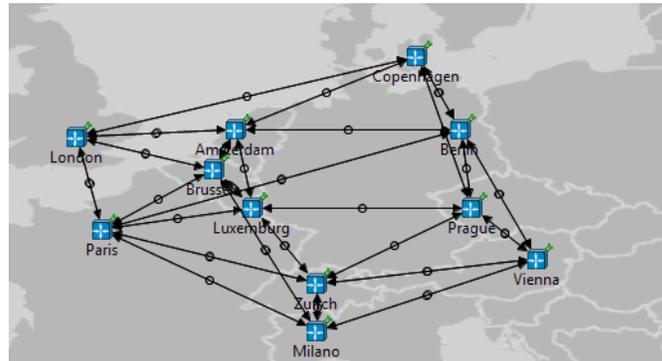


Figura 4.1. Red COST239 OBS/DWDM Implementada.

Se realizó una variación del tráfico inyectado en la red de 1,76 Gbps a 35.6 Gbps, por cada variación de tráfico, se realizaron 20 iteraciones para que los resultados fueran confiables. Cada iteración tuvo un tiempo de simulación de 1 segundo, lo que en tiempo real es represento aproximadamente 8 horas de tiempo real como mínimo.

En cada simulación se crea un objeto de registro de resultados el cual se suscribe a las señales generadas por los diferentes objetos del modelo para recolectar la información, al final de la simulación se genera los resultados de los parámetros de desempeño.

## 4.4. Fase 4. Análisis de Resultados de las Simulaciones

A continuación se describen los resultados y análisis obtenidos de las pruebas de simulación de la red COST239 OBS/DWDM.

### A. Simulación caso 1 y 2, Sub caso 1

Se configuro la red sobre la aplicación *OBS Network Configurator* con los parámetros establecidos para esta prueba. Al obtener el proyecto COST239 con ayuda de la aplicación, se procede a realizar la simulación con la herramienta OMNeT++. Luego de realizar un total de 20 iteraciones para un mismo valor de tráfico y cada una de las

configuraciones se promediaron los resultados de cada repetición por iteración, para así obtener resultados más confiables.

Tanto para la configuración que implementa el algoritmo de enrutamiento Dijkstra como para ACO, se varía el número de longitudes de onda con los que cuentan los enlaces que interconectan la red. Se obtienen las gráficas de desempeño de cada una de las configuraciones. De la Figura 4.2. a la Figura 4.4. se muestran los resultados, obtenidos y mostrados en la Tabla 4.5.; en la que se observó que a medida que el tráfico varía entre 1.76Gbps a un valor máximo de 35,2Gbps, como variable de simulación, el porcentaje de pérdida de paquetes, porcentaje de pérdida de ráfagas y probabilidad de bloqueo aumenta.

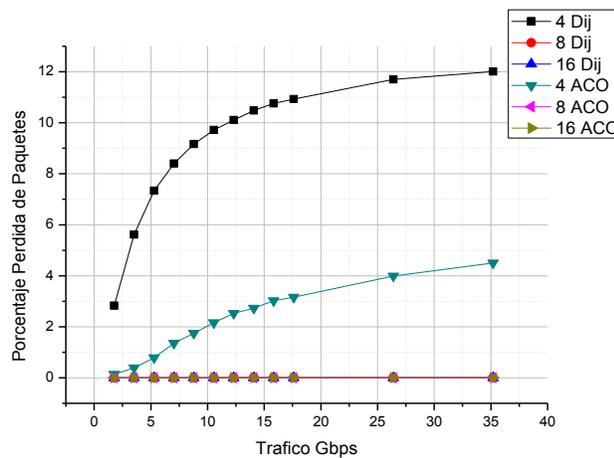


Figura 4.2. Porcentaje Pérdida de Paquetes

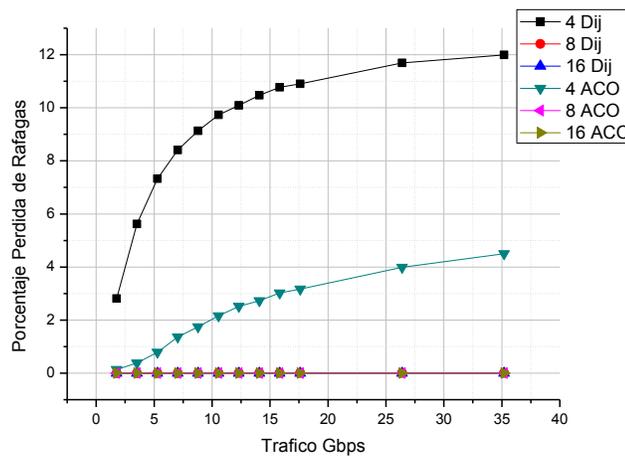


Figura 4.3. Porcentaje Pérdida de Ráfagas

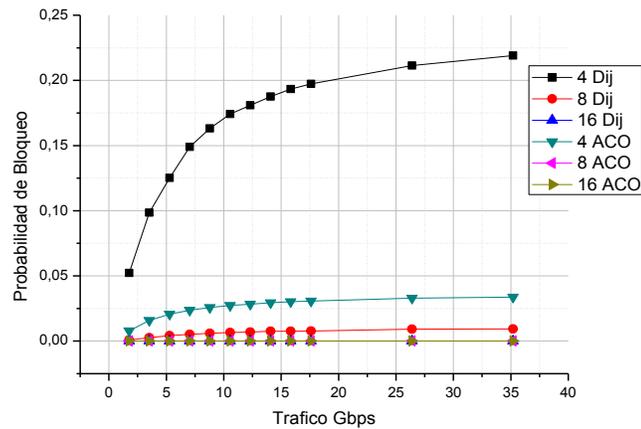


Figura 4.4. Probabilidad de Bloqueo

El comportamiento observado en las gráficas muestra la tendencia de aumentar la probabilidad de bloqueo<sup>25</sup>, porcentaje de pérdida de ráfagas y paquetes, a medida que aumenta el tráfico sobre la red, tanto para los resultados de la configuración del algoritmo Dijkstra, como para ACO. Esto puede deberse a que la asignación de los recursos de la red es cada vez más compleja, al aumentar el tráfico que circula por la red, por lo que la tarea del planificador presente en los nodos para asignar los recursos, incrementa en relación al aumento de tráfico, lidiando con el problema RWA dando como resultados más pérdidas de paquetes, ráfagas y probabilidad de bloqueo.

Al contar con un menor número de longitudes de onda en los enlaces, se cuenta con menos recursos para mitigar el tráfico en aumento que circula por la red, conllevando al aumento de la probabilidad de bloqueo, pérdida de ráfagas y al no poder ser planificadas conlleva a la pérdida de los paquetes contenidos en estas; tanto en los resultados gráficos obtenidos, para Dijkstra, como para ACO se tiene un comportamiento similar, pero es de resaltar que para el caso de ACO, los valores obtenidos reflejan una mejora considerable al compararlos con los obtenidos con Dijkstra. Concluyendo que al implementar el algoritmo de enrutamiento ACO y utilizar 16 longitudes de onda para los enlaces, se ofrece el escenario más favorable a implementar, frente a RWA.

Al contar con 8 y 16 longitudes de onda sobre los enlaces, no se logró ver la diferencia de rendimiento, esto se debe a que el tráfico inyectado sobre la red no es lo

<sup>25</sup> Número de peticiones de planificación fallidas, sobre el número total de peticiones realizadas.

suficientemente apreciable, ya que cada longitud de onda tiene una capacidad de 10Gbps, dando como capacidad por enlace de 80Gbps y 160Gbps respectivamente, por lo que estos enlaces están sobredimensionados para el tráfico que se está usando para la simulación.

Tabla 4.5. Tabla de Resultados Variación de Longitudes de Onda.

	Dijkstra			ACO			
	Tráfico	4	8	16	4	8	16
Porcentaje perdida de paquetes	1,76	2,82963	0	0,00207	0,13577	0,00206	0
	3,52	5,6145	6,82061E-4	8,05173E-4	0,38755	8,04694E-4	0
	5,28	7,33874	0,00121	5,37228E-4	0,7849	0,00115	0
	7,04	8,40025	0,00231	9,19961E-4	1,3602	9,18216E-4	0
	8,8	9,16108	0,003	4,13797E-4	1,74424	4,14007E-4	0
	10,56	9,71734	0,00344	6,51066E-4	2,15687	6,5115E-4	0
	12,32	10,10665	0,00355	0,00102	2,52251	0,00128	0
	14,08	10,48344	0,00391	9,7576E-4	2,72976	0,00218	0
	15,84	10,75823	0,00487	9,69217E-4	3,01813	9,69765E-4	0
	17,6	10,92853	0,00534	0,00126	3,16323	0,0022	0
	26,4	11,69669	0,00664	0,00116	3,98859	0,00323	0
	35,2	12,00846	0,0064	9,18145E-4	4,49797	0,00251	0
Porcentaje perdida de ráfagas	Tráfico	4	8	16	4	8	16
	1,76	2,81162	0	0,00138	0,13399	0,00138	0
	3,52	5,61903	6,81261E-4	0,00103	0,38482	0,00103	0
	5,28	7,32565	0,00121	6,12003E-4	0,78766	0,00122	0
	7,04	8,41004	0,00227	8,61292E-4	1,36444	8,60585E-4	0
	8,8	9,13477	0,00309	5,50891E-4	1,7444	5,51216E-4	0
	10,56	9,73436	0,00354	8,03635E-4	2,15777	8,03299E-4	0
	12,32	10,09224	0,00381	0,00105	2,5209	0,00131	0
	14,08	10,47428	0,00397	0,00103	2,72635	0,00232	0
	15,84	10,77347	0,00438	0,00102	3,02344	0,00102	0
	17,6	10,90565	0,005	0,00101	3,16677	0,00202	0
	26,4	11,69322	0,00679	9,78996E-4	3,99084	0,00294	0
35,2	11,99523	0,00652	9,63869E-4	4,50067	0,00265	0	
Probabilidad de bloqueo	Tráfico	4	8	16	4	8	16
	1,76	0,05231	8,48318E-4	0	0,00789	0	0
	3,52	0,09855	0,00269	2,63993E-6	0,01578	1,91149E-6	0
	5,28	0,12525	0,00414	1,05023E-5	0,02058	3,40026E-6	0
	7,04	0,14897	0,00522	1,1477E-5	0,02363	6,37445E-6	0
	8,8	0,16322	0,00591	1,8402E-5	0,02568	8,67302E-6	0
	10,56	0,17422	0,00656	2,44373E-5	0,02736	9,92004E-6	0
	12,32	0,1809	0,00696	3,40066E-5	0,02837	1,06887E-5	0
	14,08	0,18761	0,00749	4,4352E-5	0,02945	8,60866E-6	0
	15,84	0,19331	0,00753	3,30982E-5	0,03029	1,228E-5	0
	17,6	0,19731	0,00764	3,41836E-5	0,03066	1,40267E-5	0
	26,4	0,21134	0,00914	4,19723E-5	0,03289	1,90454E-5	0
35,2	0,21901	0,0093	5,15317E-5	0,03373	1,8301E-5	0	

## B. Simulación caso 1 y 2, sub caso 2

Con los parámetros configurados en esta prueba, se evalúa el comportamiento de los protocolos de reserva de recursos JET y JIT, como también la efectividad de

implementar un mecanismo de resolución de contienda, que en este caso es el de conversión de longitudes de onda, tanto para la implementación con el algoritmo de enrutamiento Dijkstra, como para ACO.

Al utilizar 16 longitudes por cada enlace de red, como se comprobó en la prueba A. Se busca superar el inconveniente de no contar con los recursos o el número de longitudes de onda en los enlaces que interconectan la red para un adecuado funcionamiento; para realizar un análisis más profundo al variar el protocolo de asignación de recursos y el método de resolución de contienda a implementar.

Las Figura 4.5. a la Figura 4.7. se observa el comportamiento de la red en cuanto a la probabilidad de bloqueo, porcentaje de pérdida de ráfagas y porcentaje de pérdida de paquetes, al implementar o no un método de resolución de contiendas en los planificadores de la red y aumentando el tráfico que circula por la red progresivamente. Los resultados se aprecian en la Tabla 4.6.

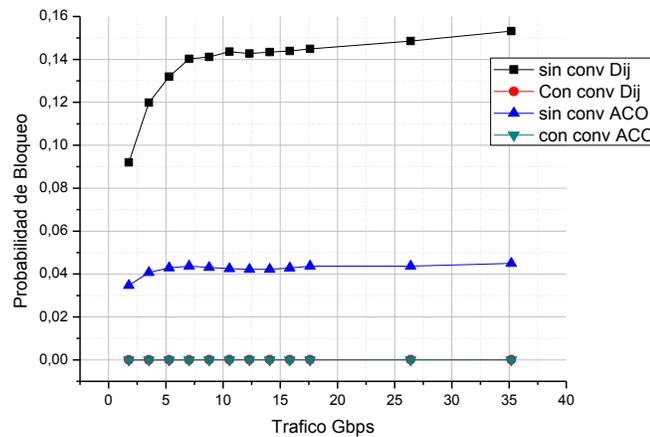


Figura 4.5. Probabilidad de Bloqueo

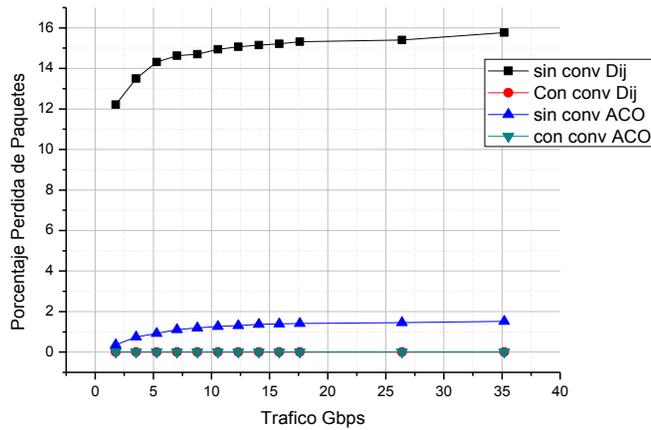


Figura 4.6. Porcentaje de Pérdidas de paquetes

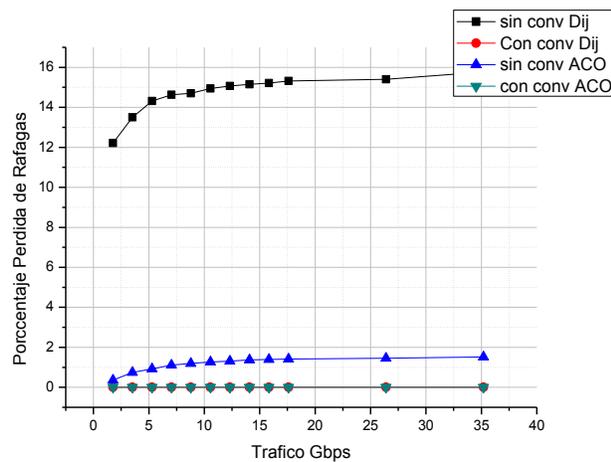


Figura 4.7. Porcentaje de Pérdida de ráfagas

Se observa que al no implementar un método de resolución de contiendas, para la asignación de recursos en el momento en que dos o más ráfagas pretenden utilizar un recurso de red (enlace), al mismo tiempo, se producen embotellamientos, donde crece la pérdida de ráfagas y aumenta la probabilidad de bloqueo de la red. Haciendo necesario la implementación de un sistema de resolución de contienda, en procura de optimizar el desempeño de la red. Este comportamiento se aprecia tanto para la implementación que utiliza el protocolo de enrutamiento Dijkstra, como para el que utiliza ACO. Es de resaltar que la implementación del mecanismo de resolución de contienda optimiza el funcionamiento de la red, evitando se presenten pérdidas de ráfagas y bloqueos, más aun cuando las redes posean recursos limitados (longitudes de onda).

Al igual que en la prueba A, se obtuvo mejores resultados en la configuración donde se implementa ACO como algoritmo de enrutamiento, mostrando que este es más eficiente, al implementarse la configuración de 16 longitudes de onda para los enlaces de la red, con conversión de longitudes de onda como mecanismo de resolución de contiendas; en la búsqueda de dar solución al problema de enrutamiento y asignación de longitudes de onda.

Tabla 4.6. Tabla de Resultados Implementación de Mecanismo de Resolución de Contiendas.

	Dijkstra			ACO	
	Tráfico	Sin Conversión	Con Conversión	Sin Conversión	Con Conversión
Porcentaje perdida de paquetes	1,76	12,21614	0,00207	0,36299	0
	3,52	13,50435	8,05173E-4	0,73961	0
	5,28	14,3103	5,37228E-4	0,92668	0
	7,04	14,63055	9,19961E-4	1,10933	0
	8,8	14,70192	4,13797E-4	1,19404	0
	10,56	14,94413	6,51066E-4	1,27017	0
	12,32	15,06247	0,00102	1,31258	0
	14,08	15,14776	9,7576E-4	1,36741	0
	15,84	15,21486	9,69217E-4	1,39451	0
	17,6	15,31731	0,00126	1,41259	0
	26,4	15,40234	0,00116	1,45805	0
	35,2	15,76863	9,18145E-4	1,51429	0
	Porcentaje perdida de ráfagas	Tráfico	Sin Conversión	Con Conversión	Sin Conversión
1,76		12,21614	0	0,36299	0
3,52		13,50435	0	0,73961	0
5,28		14,3103	0	0,92668	0
7,04		14,63055	0	1,10933	0
8,8		14,70192	0	1,19404	0
10,56		14,94413	0	1,27017	0
12,32		15,06247	0	1,31258	0
14,08		15,14776	0	1,36741	0
15,84		15,21486	0	1,39451	0
17,6		15,31731	0	1,41259	0
26,4		15,40234	0	1,45805	0
35,2		15,76863	0	1,51429	0
Probabilidad de bloqueo	Tráfico	Sin Conversión	Con Conversión	Sin Conversión	Con Conversión
	1,76	0,09199	0	0,03465	0
	3,52	0,11982	2,63993E-6	0,0407	0
	5,28	0,13193	1,05023E-5	0,04286	0
	7,04	0,14027	1,1477E-5	0,04368	0
	8,8	0,14118	1,8402E-5	0,04305	0
	10,56	0,14364	2,44373E-5	0,04253	0
	12,32	0,14269	3,40066E-5	0,04221	0
	14,08	0,14343	4,4352E-5	0,04222	0
	15,84	0,14395	3,30982E-5	0,04277	0
	17,6	0,14495	3,41836E-5	0,04364	0
	26,4	0,1486	4,19723E-5	0,04366	0
	35,2	0,1532	5,15317E-5	0,04494	0

De la Figura 4.8. a la Figura 4.10 se logra ver el comportamiento de la red al configurar los protocolos de reserva de recursos e implementar en los enlaces 16 longitudes de onda y conversión de longitudes de onda como método de resolución de contiendas.

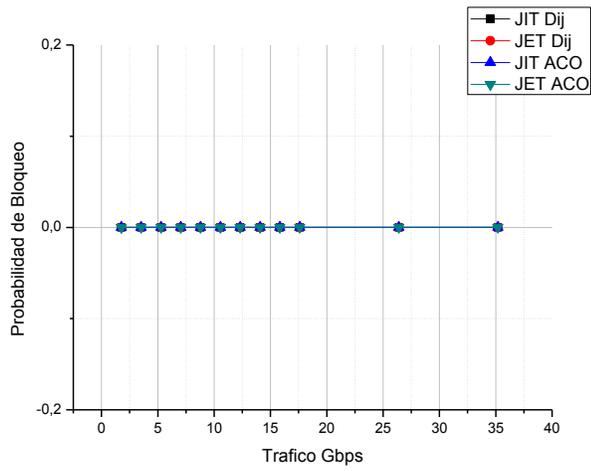


Figura 4.8. Probabilidad de Bloqueo

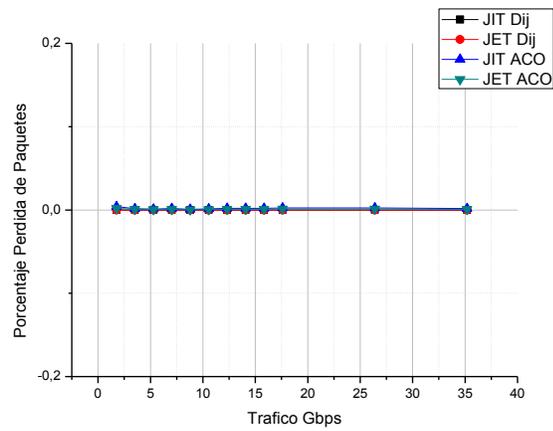


Figura 4.9. Porcentaje de Pérdida de Paquetes

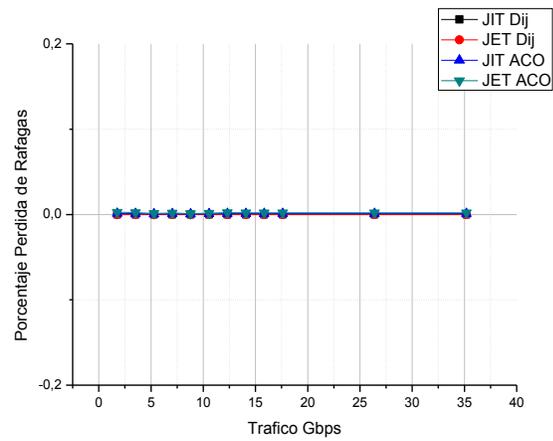


Figura 4.10. Porcentaje de Pérdida de Ráfagas

A simple vista las gráficas no arrojan suficiente información para concluir que protocolo de asignación de recursos entre JET y JIT es más eficiente para ser implementado sobre la red COST239. Por lo que se procede a cambiar el número de longitudes de onda utilizadas por los enlaces de 16 a 4, obteniendo los resultados mostrados de la Figura 4.11. a la Figura 4.13., contenidos en la Tabla 4.7.

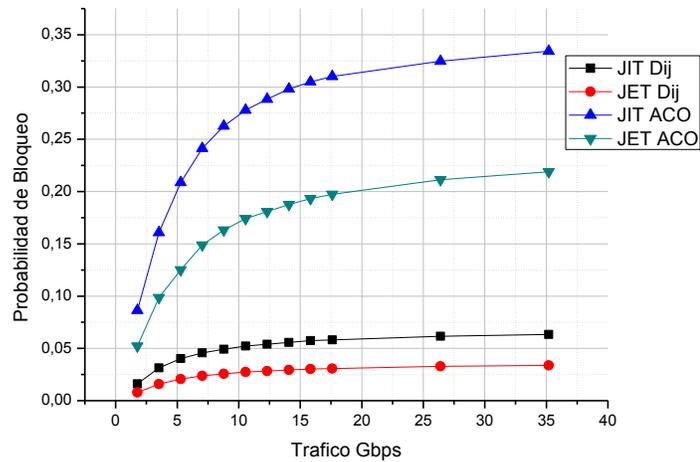


Figura 4.11. Probabilidad de Bloqueo

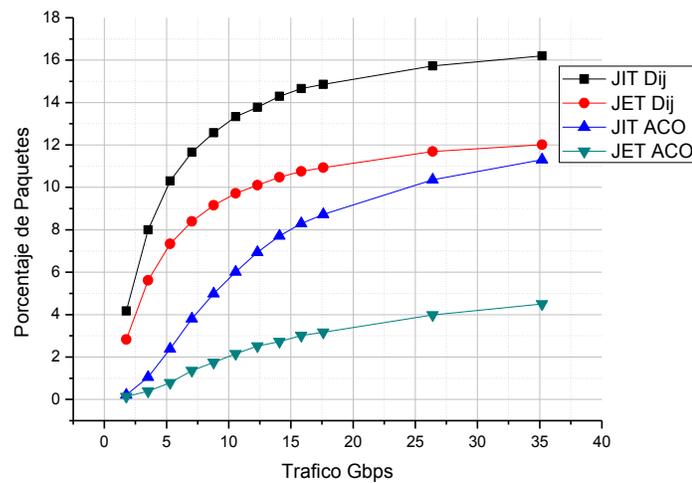


Figura 4.12. Porcentaje de Pérdida de Paquetes

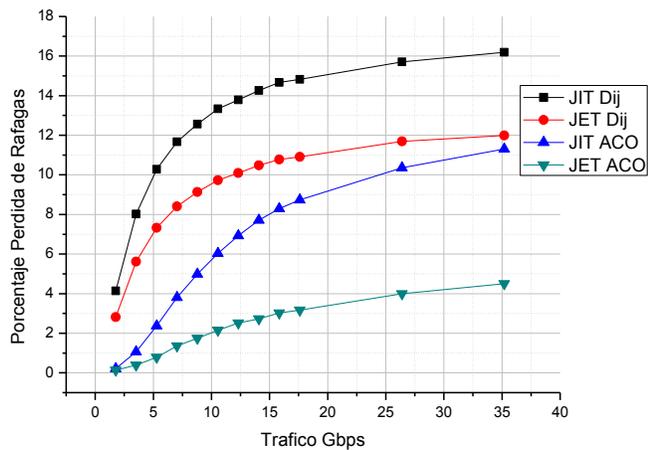


Figura 4.13. Porcentaje de Pérdida de Ráfagas

Luego de observar el comportamiento al utilizar una configuración más conflictiva, y aumentar el tráfico que circula sobre la red, tanto para Dijkstra como para ACO, se evidencia que el protocolo de reserva de recursos JET ofrece una mayor eficiencia, y según sus características es el idóneo a implementarse sobre redes OBS; este mecanismo es el que se ha implementado en la red COST239 OBS/DWDM física. Tanto para el caso en que se implemente el protocolo de enrutamiento Dijkstra como para ACO, el Protocolo de asignación de recursos JET es más eficiente que JIT. Se sigue evidenciando que el protocolo de enrutamiento ACO en todas las configuraciones realizadas sobre las simulaciones, es más eficiente que el que implementa el protocolo de enrutamiento Dijkstra.

Tabla 4.7. Tabla de Resultados Variación de Protocolo de Asignación de Recursos.

	Dijkstra			ACO	
	Tráfico	JIT	JET	JIT	JET
Porcentaje perdida de paquetes	1,76	4,16641	2,82963	0,21386	0,13577
	3,52	7,99693	5,6145	1,0531	0,38755
	5,28	10,30233	7,33874	2,38054	0,7849
	7,04	11,66006	8,40025	3,80701	1,3602
	8,8	12,57245	9,16108	4,98463	1,74424
	10,56	13,33275	9,71734	6,01391	2,15687
	12,32	13,78142	10,10665	6,93493	2,52251
	14,08	14,29555	10,48344	7,70912	2,72976
	15,84	14,65981	10,75823	8,2952	3,01813
	17,6	14,86263	10,92853	8,73041	3,16323
	26,4	15,72822	11,69669	10,35781	3,98859
	35,2	16,19982	12,00846	11,30682	4,49797
Porcentaje perdida de ráfagas	Tráfico	JIT	JET	JIT	JET
	1,76	4,14069	2,81162	0,21464	0,13399
	3,52	8,02027	5,61903	1,06533	0,38482
	5,28	10,28079	7,32565	2,37516	0,78766
	7,04	11,66969	8,41004	3,80628	1,36444
	8,8	12,56277	9,13477	4,98857	1,7444
	10,56	13,33775	9,73436	6,0378	2,15777
	12,32	13,78258	10,09224	6,92768	2,5209
	14,08	14,26295	10,47428	7,70868	2,72635
	15,84	14,66715	10,77347	8,29753	3,02344
	17,6	14,8273	10,90565	8,73772	3,16677
	26,4	15,70596	11,69322	10,35587	3,99084
35,2	16,19252	11,99523	11,31169	4,50067	
Probabilidad de bloqueo	Tráfico	JIT	JET	JIT	JET
	1,76	0,08631	0,05231	0,01616	0,00789
	3,52	0,16083	0,09855	0,03133	0,01578
	5,28	0,2087	0,12525	0,04018	0,02058
	7,04	0,24146	0,14897	0,04563	0,02363
	8,8	0,2628	0,16322	0,04914	0,02568
	10,56	0,27791	0,17422	0,05219	0,02736
	12,32	0,28828	0,1809	0,05393	0,02837
	14,08	0,29807	0,18761	0,05581	0,02945
	15,84	0,305	0,19331	0,05741	0,03029
	17,6	0,31024	0,19731	0,05804	0,03066
	26,4	0,32477	0,21134	0,06149	0,03289
35,2	0,3343	0,21901	0,0634	0,03373	

Para complementar el análisis realizado a la red COST239 OBS/DWDM, se observa el comportamiento según los histogramas de retardo de paquetes extremo a extremo con 16 longitudes de onda, con JET como protocolo de reserva de recursos y con conversión de longitudes de onda como mecanismo de resolución de contienda con dos valores de tráfico generado. De la Figura 4.14. a la Figura 4.17. se muestra la variación del número de paquetes en función del retardo que han experimentado en su camino desde la fuente hasta el destino a través de la red. Cada simulación tiene una duración de 1 segundo tiempo de simulación, se realizaron 20 simulaciones con una variación del tráfico generado por la red.

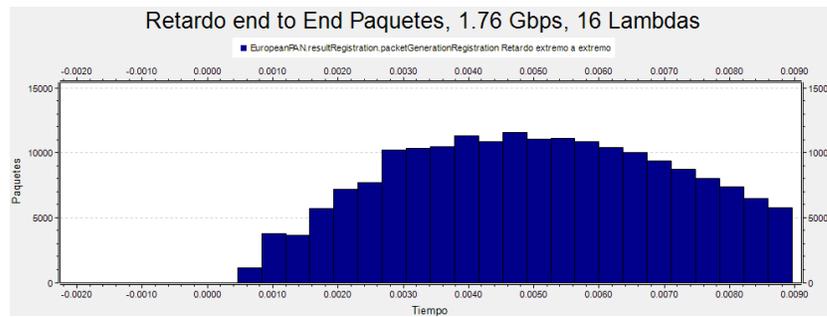


Figura 4.14. Retardo Extremo a Extremo Paquetes, 1.76Gbps, 16 Lambdas Dijkstra.

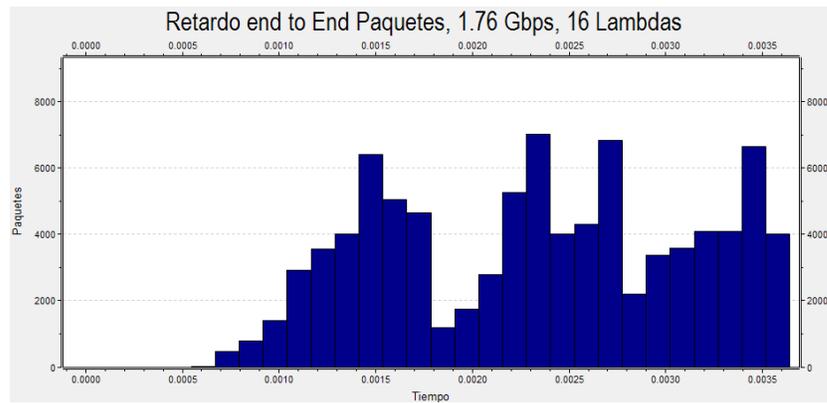


Figura 4.15. Retardo Extremo a Extremo Paquetes, 1.76Gbps, 16 Lambdas ACO.

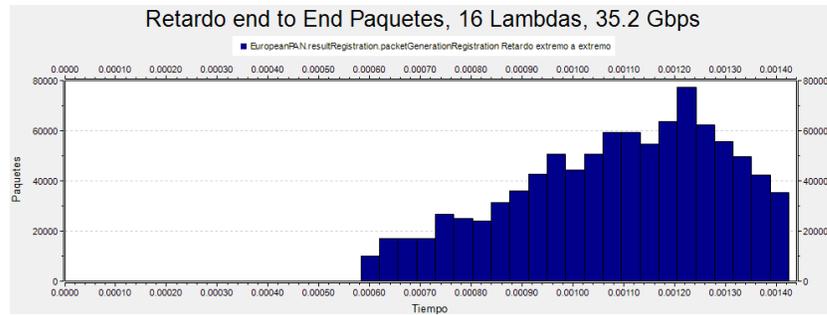


Figura 4.16. Retardo Extremo a Extremo Paquetes, 35.2Gbps, 16 Lambdas Dijkstra.

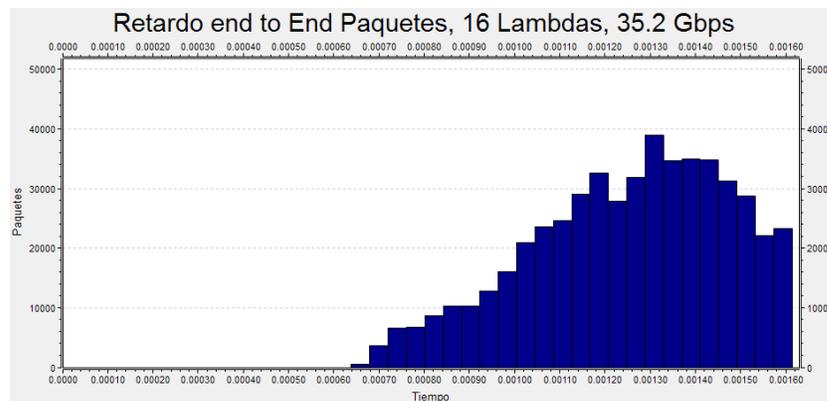


Figura 4.17. Retardo Extremo a Extremo Paquetes, 35.2Gbps, 16 Lambdas, ACO

Se observa que a menor tráfico generado por la red (1.76 Gbps) la mayoría de los paquetes experimentan un retardo extremo a extremo menor que el observado en la configuración con mayor tráfico (35.2 Gbps). Esto sugiere que a mayor tráfico generado por la red se produce un mayor retardo de propagación extremo a extremo tanto para la implementación con el algoritmo Dijkstra como para el algoritmo ACO, una posible causa es que a mayor tráfico los recursos de la red se encuentran ocupados, por lo tanto los paquetes son almacenados en una cola en la matriz de conmutación eléctrica en el nodo de borde, esperando que se le asigne un camino óptico a su ráfaga asociada. Al utilizar el algoritmo de enrutamiento ACO, se observa que los paquetes presentan menor retardo en comparación con los paquetes de la implementación del algoritmo Dijkstra.

La Figura 4.18. a la Figura 4.21. se muestra el histograma de retardo de propagación extremo a extremo de las ráfagas circulantes por la red, se observa un comportamiento similar a la figuras que muestran el retardo extremo a extremo de paquetes, donde a mayor tráfico, mayor retardo.

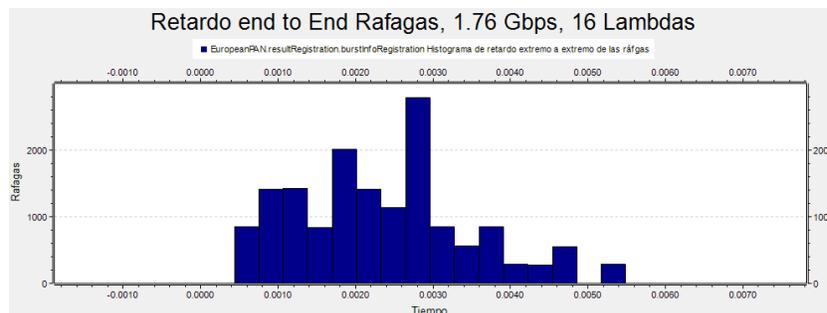


Figura 4.18. Retardo extremo a Extremo Ráfagas, 1.76Gbps, 16 lambdas Dijkstra.

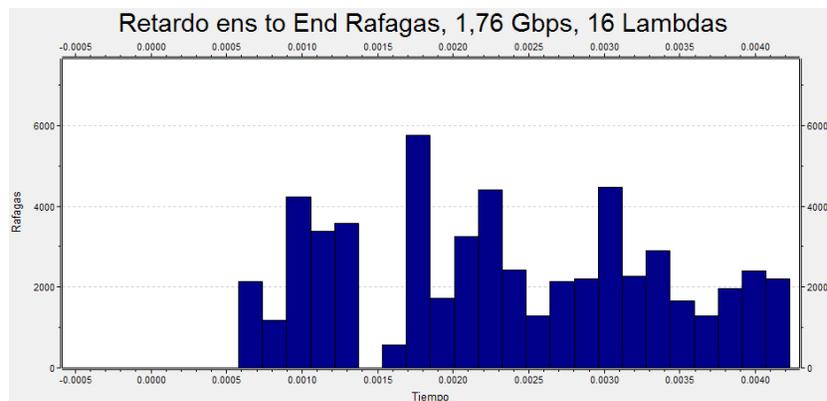


Figura 4.19. Retardo extremo a Extremo Ráfagas, 1.76Gbps, 16 lambdas ACO

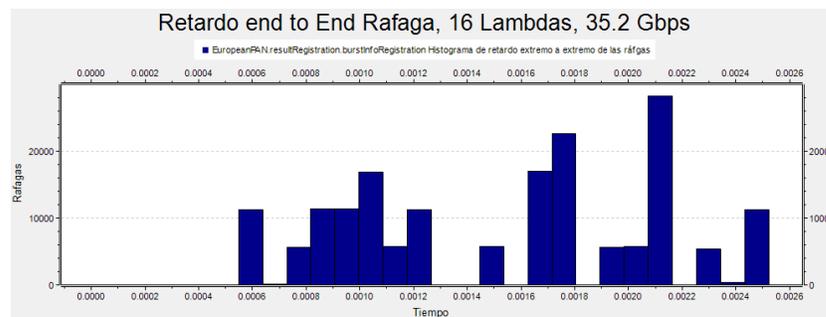


Figura 4.20. Retardo extremo a Extremo ráfagas, 35.2Gbps, 16 Lambdas Dijkstra.

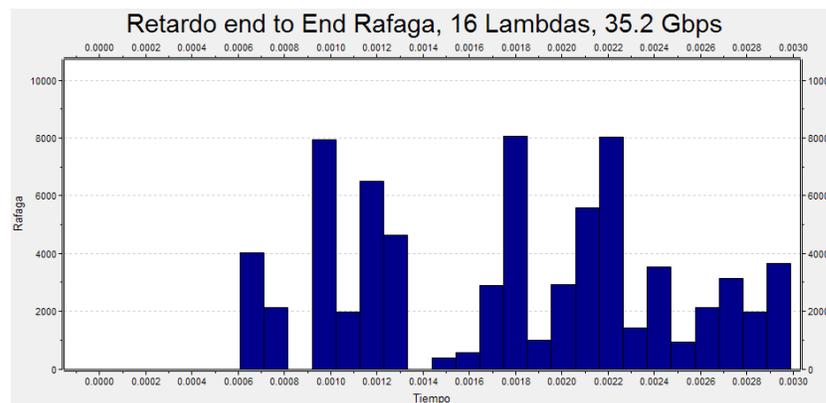


Figura 4.21. Retardo extremo a Extremo ráfagas, 35.2Gbps, 16 Lambdas ACO

Esto debido a que una vez es asignado los recursos por el planificador del nodo de borde para una ráfaga, esta transita en forma transparente por la red sin retardo alguno.

Las simulaciones realizadas arrojan los resultados necesarios para concluir que el protocolo de enrutamiento ACO es más eficiente que el protocolo Dijkstra, que es uno de los más utilizados en redes ópticas en la actualidad. Se logra dar solución a la problemática de enrutamiento y asignación de longitudes de onda en la red COST239, al implementar el protocolo de enrutamiento ACO, protocolo de asignación de recursos JET y conversión de longitudes de onda como mecanismo de resolución de contiendas, reflejándose en la reducción considerable del parámetro de probabilidad de bloqueo, haciéndolo despreciable respecto a los peticiones de conexión efectuadas en el transcurso de la simulación sobre la red, en comparación al implementado con Dijkstra.



## Capítulo 5

# Conclusiones, Recomendaciones y Trabajos Futuros.

En este capítulo se describen las vivencias que se obtuvieron al realizar este trabajo de grado, exponiendo claramente las conclusiones, recomendaciones, dificultades y facilidades que se presentan al trabajar con la herramienta software OMNeT++.

### 5.1. Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones a las que se llegó según la experiencia adquirida durante el desarrollo del presente trabajo de grado.

Al analizar comparativamente el desempeño de la red COST239 OBS/DWDM respecto a RWA a nivel de simulación con la implementación del algoritmo de optimización ACO y Dijkstra. Con el algoritmo de enrutamiento ACO se obtuvo un mejor desempeño respecto a la probabilidad de bloqueo de la red, mostrando que es una alternativa para dar solución a la problemática de enrutamiento y asignación de longitudes de onda.

Se caracterizó a nivel de simulación mediante la herramienta OMNeT++ el problema RWA presente en las redes OBS/DWDM, en particular sobre la implementación a nivel de simulación de la red COST239 OBS/DWDM, ya que se logró una abstracción de sus componentes y recursos.

Se desarrollaron en el transcurso de este trabajo de grado una herramienta altamente configurable, en la que los estudiantes de la Universidad del Cauca u otra persona interesada, pueda realizar la implementación y caracterización de proyectos de redes OBS, esta herramienta tiene el nombre de *OBS Network Configurator*.

Se desarrollo un modelo sobre OMNeT++ para modelar redes OBS, este se denominó como MGSR OBS/DWDM, que contiene las definiciones de las partes fundamentales y funcionales. Es una librería creada bajo la métrica de modularidad, permitiendo un bajo acoplamiento y alta cohesión entre sus partes.

Los modelos desarrollados en este trabajo de grado, quedan abiertos a futuras implementaciones, modificaciones y optimizaciones; buscando siempre el aporte a la investigación educativa.

Se desarrolló un algoritmo de enrutamiento ACO, basado en el comportamiento social que tienen las hormigas en la búsqueda de alimento, utilizando para encontrar las rutas más cortas entre la colonia (nodo ingreso) y el alimento (nodo egreso), con ayuda de la implementación de dos paquetes especiales (Hormiga exploradora, Hormiga de mantenimiento).

La implementación de ACO en la red COST239 OBS/DWDM mejoró considerablemente el desempeño, reduciendo el porcentaje de perdida paquetes, porcentaje de perdida de ráfagas y probabilidad de bloqueo frente al algoritmo de enrutamiento basado en Dijkstra. Sin desmeritar su funcionalidad, ya que en la actualidad es uno de los algoritmos más implementados en la búsqueda de rutas, teniendo como métrica la menor distancia, entre un nodo de origen y uno de destino.

Se desarrolló un informe referente a la investigación sobre el análisis del desempeño de la red OBS COST239 aplicando inteligencia de enjambre, utilizando el algoritmo de optimización por colonia de hormigas para resolver el problema de enrutamiento y asignación de longitudes de onda.

## 5.2. Recomendaciones

El uso de la herramienta OMNeT++ para desarrollo y posterior simulación de redes, presenta una complejidad elevada, por lo que se recomienda un entrenamiento previo en lenguaje de programación C++, en un nivel medio o avanzado. A pesar de ser una herramienta robusta, que permite explorar, expandir e implementar ideas propias en las implementaciones; debe tenerse cuidado a la hora de utilizar la herramienta OMNeT++, presentan múltiples inconvenientes, tales como: la compatibilidad de

OMNeT y Inet; la elección del sistema operativo a utilizar, se obtuvo un mejor desempeño sobre Linux; bucks de OMNeT++ que en repetidas ocasiones entorpecen las simulaciones y el correcto funcionamiento de la herramienta; dificultad en la búsqueda de errores de implementación con el compilador que cuenta la herramienta; utilización de algunos tipos de datos y estructuras propias del lenguaje de programación C++, no se permite la implementación de datos multidimensionales (matrices).

Como se mencionó anterior mente, OMNeT++ es una herramienta robusta que permite la implementación y creación de modelos propios, fomentando la creatividad y pericia de los estudiantes a la hora de desarrollar sus implementaciones. Permite por medio de su sistema basado en modularidad la alta cohesión y bajo acoplamiento, facilitando la creación de proyectos.

Una forma común de enviar datos de un módulo a otro, es emplear el método SEND, pasando como parámetro el nombre del puerto de salida que conecta con el otro modulo, al realizarse esto con mucha frecuencia, se afecta negativamente el rendimiento, ya que cada vez que se usa este método, el núcleo de OMNeT debe realizar una búsqueda del puerto de salida y esta implica comparación de cadenas en cada compuerta. Una alternativa consiste en realizar la consulta del puerto de salida durante la inicialización y mantener una referencia a él durante el tiempo de simulación, de este modo se puede pasar como parámetro del método SEND, evitando que el núcleo de OMNeT realice la búsqueda, anteriormente mencionada.

## 5.3. Trabajos Futuros

Con el desarrollo de este trabajo se diseñó un modelo base para la generación de redes OBS, en el que se buscó la modularidad de cada uno de sus componentes, con el fin de dejar abierta esta herramienta a futuras implementaciones, tales como algoritmos de enrutamiento, mecanismos de planificación, matrices de conmutación con conversión de longitud de onda limitada, ráfagas con segmentación, mecanismos de señalización mediante la implementación de las unidades de control, mecanismos de asignación de recursos, mecanismos de resolución de contiendas, QoS, que fácilmente se pueden ajustar y acoplar por medio de la creación de un módulo al modelo existente.

Para facilitar la implementación y caracterización de las redes OBS, se desarrolló una aplicación llamada *OBS Network Configurator* (ver Anexo C) que facilita la configuración de diferentes topologías de red, caracterización de sus elementos y la generación de configuraciones; que al realizarse directamente sobre la herramienta OMNeT++ resulta ser tediosa y engorrosa, por lo que se pueden cometer errores en su configuración. Se recomienda la exploración y utilización de la aplicación para procesos educativos y facilitar la implementación de redes OBS en el ámbito académico.

## Referencias

- [1] P. Benzamilla, et al., "Evolucion de los servicios de Banda Ancha y su Correspondiente trafico", Cantabria, España: Universidad de Cantabria, 2012, pp. 5-30.
- [2] R. M. Torres, Sociedad de la Información/Sociedad del conocimiento [En línea], Paris, Francia: Vecam, 2005.
- [3] A. Rivoir, et al, "América Latina y el Caribe en la Economía y Sociedad del Conocimiento", vol. 1, G. S. Daza, Ed., Puebla: CLACSO, Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, ISBN: 978 607 7541 86 8, 2009, p. 332.
- [4] F. Networks, *Cableado de Fibra Óptica para Comunicaciones de Datos - Manual de Comprobación y Solución de Problemas [En línea]*, U.S.A: Network Supervisión, Fluke Networks, 2009.
- [5] L. Hinojosa, "Temas Selectos de Fibra Óptica", Pachuca: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2007, pp. 1-11.
- [6] A. D. Lescano, et al., "Fibra Óptica la Gran Maravilla Moderna", Ciudad del Río Cuarto, Argentina: Mayor Ingeniero Francisco de Arteaga, IPEM 258, 2008.
- [7] B. A. Rivas, "Enrutado y Asignación de Longitudes de Onda", España: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática, Universidad Rey Juan Carlos, 2010, pp. 2 - 4.
- [8] H. Zang, J. Jue, and B. Mukherjee, "A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength - Routed Optical WDM Networks ", O. N. Magazine, Ed., Dallas, U.S.A: SPIE/Baltzer Science Publishers 1388 6916, 2000.
- [9] F. C. Oliva, "Redes WDM de Enrutamiento por Longitud de Onda", Valparaíso, Chile: Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Electrónica, 2002.

- [10] J. Capmany, B. Ortega, *Redes Ópticas* [En línea], Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2006, pp. 149 - 152.
- [11] E. Málaga, "Teorías de Autómatas y Lenguajes Formales", Cáceres, España: Universidad de Extremadura, Colección Manuales uex - 55, ISBN 978-84-691-6345-0, 2008, pp. 141 - 142.
- [12] C. E. Casallas, S. F. Vargas, «Inteligencia de Enjambres: Optimización por Cúmulos de Partículas», *Bioescenarios IV*, vol. IV, p. 18, 2011.
- [13] L. A. García, «Usos y Aplicaciones de la Ingeniería Artificial», *Revista de divulgación científica y tecnológica de la universidad veracruzana*, vol. 18, nº 3, 2004.
- [14] A. E. Vidal, «Alan Turing y el Nacimiento de la Inteligencia Artificial», *Antena de telecomunicaciones*, nº 167, p. 45, 2007.
- [15] M. A. Muñoz, J. A. López and E. F. Caicedo, «Swarm Intelligence: Problem - Solving Societies (a Review)», *Trevisit Engineering e Investigation*, vol. 28, nº 2, pp. 119 - 130, 2008.
- [16] A. Hertz, D. Kobler, «A Framework for the Description of Evolutionary Algorithms», *European Journal of operational research*, vol. 126, nº 1, pp. 1-12, Octubre - 2000.
- [17] A. García, et al., «La Teoría de los Enjambres en los Modelos de Organización de las Empresas Audiovisuales de Televisión Digital», *CES Felipe II*, nº 8, pp. 1-10, 2008.
- [18] A. Kutsenok, «Swarm AI: General-Purpose Swarm Intelligence Technique», *DESIGN PRINCIPLES AND PRACTICES: AN INTERNATIONAL JOURNAL*, p. 3, 2011.
- [19] A. Jevtíc, D. Andina, «Swarm Intelligence and its Applications in Swarm Robotics», de *Conference on Computational Intelligence, Man-Machine Systems and Cybernetics*, ISBN: 978-960-6766 -21-3, España, 2007.
- [20] M. Dorigo, T. Stützle, "Ant Colony Optimization", London, Inglad: Massachusetts Institute of Technology, A Bradford Book The MIT Press Cambridge, 2004.
- [21] MinTIC, «Proyecto Nacional de Fibra Óptica», [En línea]. Available: <http://www.mintic.gov.co/index.php/direccion-onectividad/proyectos/proyecto-nacional-fibra-optica..>

- [22] D. Gavalas, "Optical Network Design: Virtual Topology and Wavelength Assignment Using Lineal Programming", Colchester, Gran Bretaña: Msc in Telecommunications & Information Systems, University of ESSEX, 1997.
- [23] A. L. Barradas, M. C. Medeiros, «An OMNeT++ Model for the Evaluation of OBS Routing Strategies», de *Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops*, Marseille, France, 2008.
- [24] L. G. Tan, M. C. Sinclair, "Wavelength Assignment between the Central Nodes of the COST 239 European Optical Network", Liverpool: UK Performance Engineering Workshop, 1995, pp. 235-247.
- [25] C. Serrano, "Un modelo integral para un profesional en ingeniería", Popayán, Colombia: Universidad del Cauca, 2003.
- [26] C. Hoyos, "Un modelo para la investigación documental", Medellín, Colombia: Señal editorial, 2000.
- [27] C. Serrano, "Modelo para la construcción de soluciones", Popayán, Colombia: Universidad del Cauca, 2005.
- [28] E. Astaiza, H. Bermúdez, and P. Muñoz, "Simulación de sistemas de telecomunicaciones", Popayán, Colombia: Universidad del Cauca, 2004.
- [29] E. J. Ayala, "Estudio de la Técnica de Acceso Múltiple por división de Código Óptico", Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, facultad de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, 2008, pp. 1-17.
- [30] R. Millan, "Redes y tecnología WDM", Valladolid, España, 2000.
- [31] A. Hincapie, T. Peña, "Análisis del Desempeño del RWA en Redes OBSWDM con Control Cognitivo Basado en Algoritmos Genéticos", Popayán, Colombia: Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, 2013.
- [32] G. J. Andrade, "Estudio de la Tecnología de Conmutación Óptica por ráfagas - OBS y Análisis de Migración de Redes Ópticas Pasivas a esta Tecnología", Sangolquí, Ecuador: Departamento de eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica del Ejército, 2011, pp. 20-22.
- [33] J. M. Vásquez, "Diseño y Desarrollo de una Aplicación para el Estudio Comparativo de Topologías de Red", Madrid, España: Escuela Politécnica, Universidad Carlos III, 2011.

- [34] J. Grijalba, G. Gomez, "Análisis del Desempeño de Formatos de Modulación en Comunicaciones Ópticas sobre Redes WDM", Popayán, Cauca: Universidad del Cauca, 2010.
- [35] M. Á. Tena, "Evaluación de Arquitecturas de Red Híbridas OBS/OCS", Barcelona, España: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de Barcelona, 2009.
- [36] Unión Internacional de Telecomunicaciones, "SERIE G: Sistemas y Medios de Transmisión, Sistemas y Redes Digitales", Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2006.
- [37] Applied Optoelectronics Center, "WDM and DWDM Multiplexing", School of Electronic and Communications Engineering, 2002.
- [38] Communication Consultants , "Wavelength Division Multiplexing CWDM vs DWDM", Frago, 2006.
- [39] C. Zapata, D. Constaín, "Definición de Criterios y Procedimientos que Permitan el Dimensionamiento de Redes Ópticas WDM Mediante el Análisis de los Principales Efectos de Transmisión Óptica", Popayán, Cauca: Universidad del Cauca, 2008.
- [40] A. Rodríguez, "Redes Ópticas", Madrid, España: Universidad Pontificia ICAI, Dept. de Ingeniería, 2011.
- [41] G. Puerto, "Redes de Conmutación de Paquetes Ópticos Basadas en el Intercambio de Etiquetas Multiplexadas por Subportadora", Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, Dept. de Comunicaciones, 2007, p. 13.
- [42] J. D. Gil, "Estudio de la Integración de los Protocolos de GMPLS en Redes OBS", Catalunya: Universidad Politecnica de Catalunya, 2009, pp. 6,7.
- [43] D. A. Cardenas, "Estudio y Simulación de la Tecnología de Conmutación Óptica Por Rafagas", Quito: Escuela Politecnica Nacional, Abril de 2010, pp. 4-7.
- [44] A. Manzanera, "Diseño y Evaluación de Presentaciones de una Red Óptica OBS Multinodo Mediante Herramienta de Simulación", Cartagena, España: Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Universidad Politecnica de Cartagena, Julio, 2009, pp. 8-22.

- [45] Y. Chen, C. Qiao and X. Yu, "Optical Burst Switching (OBS): A New Area in Optical Networking Reseah", New York, EEUU: Computer Science and Engineering Department, State University of New York at Buffalo.
- [46] A. K. Garg, «A novel hybrid approach for efficient network utilization of OBS», *International Journal of Software Enginnering and its Applications*, vol. 6, nº 1, Enero 2012.
- [47] Ó. González, "Rendimiento de TCP y Cálculo de Rutas en Redes de Conmutación Óptica de Ráfagas", Valladolid, España: Dpto. de teoría de la Señal y Comunicaciones ingeniería Telemática, 2012, pp. 14-17.
- [48] M. Klinkowski, "Offser Time-Emulated architecture for Optical Burst Swiching - Modellingn and Performance Evaluation", Barcelona - España: Universitat Politecnica de Catalunya, 2007.
- [49] K. Chao, el al., «Information Model af an Optical Burst Edge Switch», *IEEE ICC*, vol. 5, 2002.
- [50] L. Xu, H. Perros, and G. Rouskas, "Performance Analysis of an Edge Optical Burst Switching Node with a Large Number of Wavelengths ", North Carolina: Deparment os Computer Science, North Carolina Sate University, NC 27695-7534, 2003.
- [51] G. Jaramillo, "Estudio de la Tecnología de Conmutación Óptica por ráfagas - OBS y Análisis de Migración de Redes Ópticas Pasivas a esta Tecnología", Sangolquí, Ecuador: Departamento de eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica del Ejército, 2011, pp. 20-22.
- [52] M. Yoo, C.Qiao, "Just Enough Time (JET): A High Speed Protocol for Bursty Traffic in Optical Networks", Proc. IEEE/LEOS Conf. Tech. Global Info. Infrastructure, Agosto 1997, pp. 26-27.
- [53] Q. Chunming, Y. Myungsik, «Optical Burst Switching (OBS) a New Paradigm for an Optical Internet», *Journal of High Speed Networks*, vol. 8, pp. 69-84, 1999.
- [54] C. García, "Definición y Evaluación de Estrategias de Encaminamiento Multicamino para Redes de Conmutación deRáfagas Ópticas", Malaga: Universisas de Malaga, 2007.
- [55] I. C. Graña, "Simulación y Comparativa de Mecanismos de Conmutación en Redes Ópticas", Pontevedra: Universidad de Vigo, 2004, pp. 30,31.

- [56] J. C. Rodriguez, "Análisis de la Calidad del Streaming de Vídeo a Través de Redes OBS", Valencia: Universidad Politecnica de Valencia, Escuela Técnica Sup. de Ingenieros de Telecomunicación, 2009.
- [57] J. Lambert, V. Houdt, and C. Blondia, «A Preventive Conversion Mechanism For Conflict Resolution in Optical Burst Switched Networks», *Networking and Electronic Commerce Research Conference (NAEC 2005)*, pp. 545-555, 2005.
- [58] M. V. Vokkarane, J.P Jue, «Segmentation-Based Non-Preemptive Channel Scheduling Algorithms for Optical Burst-Switched Networks», *Proc. 1st Intl' Wksp. OBS*, 2003.
- [59] E. Rodriguez, A. Terra, "Mecanismos de Resolución de contenses per a xarxes de commutació óptica de ráfagues (OBS)", Treball fi de carrera, 2005.
- [60] B. M. Pascual, M. N. Parra, "Estudio e Implementación de Mecanismos de Asignación de Longitudes de Onde para Redes OBS sin Colisiones", Catalunya: Universidad Politecnica de Catalunya, 2009.
- [61] R. Ramaswami, K. Sivarajan, "Routing and Wavelength Assignment in all optical network", *IEE/ACM Transactions on Networking*, 1995.
- [62] M. C. Sinclair, M. J. Mahony, "COST 239: Initial Network Design and Analysis", Brussels: Proc. 36th RACE Concertation, 1993.
- [63] M. C. Sinclair, "Minimum Cost Topology Optimisation of the COST 239 European Optical Network", Icannga: Proc. 2nd Intl. Conf. on Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms, 26-29, April 1995.
- [64] R. Inkret, A. Kuchar, and B. Mikac, "Advanced Infrastructure for Photonic Networks", M. C. o. t. P. C. 266, Ed., Zagreb: ISBN 953-184-064-4, Extended final Report of Cost Action 266, Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb, 2003.
- [65] C. Insfrán, D. Pinto, and B. Barán, "Diseño de Topologías Virtuales en Redes Ópticas. Un Enfoque Basado en Colonia de Hormigas", Santiago de Chile: In: 32a Conferencia Latinoamericana de Informática CLEI 2006, Universidad Nacional de Asunción, Campus Universitario San Lorenzo, 2006, pp. 4-10.

- [66] S. Shrinivas et al., «Applications of Graph Theory in Computer Science an Overview», vol. 9, pp. 4610-4621, 2010.
- [67] S. Salas, "On the Dijkstra Algorithm", vol. 2, I. d. o. S. e. arXiv, Ed., Cornell, EUU: Cornell University Library / Cornell University, Junio 2008.
- [68] L. Araujo, R. Martínez, and M. Rodríguez, "Programación y Estructuras de Datos Avanzadas", Uned, Ed., Madrid: ISBN-13: 978-84-9961-022-1, Centro de Estudios Ramón Areces, S.A., 2011.
- [69] M. Pedemonte, "Ant Colony Optimization para la Resolución del Problema de Steiner Generalizado", Montivideo, Uruguay: Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, 2009, pp. 12-20.
- [70] P. Miller, "Teoría de los Enjambres", National Geographic, Julio 2007, pp. 90-110.
- [71] E. Bonabeau, C. Meyer, "Swarm Intelligence: A Whole New Way to Think About Business", Harvard Business Review, Vol.79, no.5, Mayo 2001, pp. 106-114.
- [72] C. Merkle, M. Diddendorf, "Swarm Intelligence", Germany: Department of Computer Science, University of Leipzig, chapter 14, 2006, pp. 401-429.
- [73] G. F., "Tabu Search", vol. 1, ORSA: Journal on Computing, 1989, pp. 190-206.
- [74] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing", vol. 220, Science, New Series, May 13, 1983, pp. 671-680.
- [75] J. Marquez, K. Sakallah, "GRASP: A Search Algorithm for Propositional Satisfiability", vol. 28, Computers, IEEE Transactions on, May 1999, pp. 506-521.
- [76] M. A. Muñoz, "Estrategias evolutivas aplicadas a los algoritmos en enjambres para el control de sistemas complejos", Cali, Colombia: Facultad de Ingeniería, Escuela de ingeniería eléctrica y electrónica, 2008, pp. 14-17.
- [77] J. Rodríguez, "Análisis de Algoritmos Basados en Colonia de Hormigas en Problemas de Camino Mínimo", Madrid, España: Universidad Carlos III, Escuela Politécnica Superior, Enero, 2010.
- [78] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Coloni, "Ant System: An Autocatalytic Optimizing Process", vol. 26, IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, 1996, pp. 1-13.

- [79] F. Espina, et al., "Arquitectura y Diseño de un Modelo de Red OBS para Simulación", Pamplona: Universidad Publica Navarra, Campus de Arrosadía, 2009.
- [80] M. Rodriguez, "Elección de una herramienta de simulación", Santiago de Cali: Universidad Icesi, 2013.
- [81] M. Á. Martinez, "Diseño y Simulación de un Sistema para Detección de Intrusos en Redes de Comunicaciones Utilizando OMNeT++", Choluca, Puebla, Mexico: Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla, 2010.