

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UNA RED OBS/DWDM  
DISTRIBUIDA MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE UN  
MÉTODO COGNITIVO BASADO EN METAHEURÍSTICA  
HÍBRIDA PARA EL ENSAMBLE DE RÁFAGAS**



Juan Camilo Bravo Flórez

Juan David Prado López

---

*Director: Ph.D. 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**



**JUAN CAMILO BRAVO FLÓREZ  
JUAN DAVID PRADO LÓPEZ.**

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UNA RED OBS/DWDM  
DISTRIBUIDA MEDIANTE LA INTEGRACION DE UN  
MÉTODO COGNITIVO BASADO EN METAHERÍSTICAS  
HÍBRIDAS PARA EL ENSAMBLE DE RÁFAGAS**

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

**Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones**

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

**Popayán  
2015**



## TABLA DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
1.1 Planteamiento del problema .....	11
1.2 Escenario de motivación.....	13
1.3 Objetivos .....	14
1.4 Enfoque.....	14
1.5 Alcance.....	16
1.6 Aportes.....	17
1.7 Contenido del documento final .....	17
<b>CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>19</b>
2.1 Introducción a las comunicaciones ópticas.....	19
2.2 Conmutación Óptica.....	20
2.3 Método cognitivo .....	38
2.4 Metaheurísticas.....	41
<b>CAPITULO 3: IMPLEMENTACIÓN DE LOS MÓDULOS DE LA RED.....</b>	<b>51</b>
3.1 Selección de la herramienta de simulación.....	52
3.2 Selección de las técnicas Metaheurísticas para el Ensamble de Ráfagas.....	56
3.3 Implementación de los módulos de la red EON basada en una red OBS/DWDM57	
<b>CAPÍTULO 4: CASOS DE ESTUDIO .....</b>	<b>69</b>
<b>4.1. Introducción .....</b>	<b>69</b>
<b>4.2. Casos de Simulación .....</b>	<b>69</b>
4.2.1. Caso 1: Red EON con implementación de algoritmo de ensamble por longitud o número de paquetes, lo que ocurra primero.....	69
4.2.2. Caso 2: Red EON con implementación del método cognitivo basado en una metaheurística híbrida.....	70
4.2.3. Sub Casos de Simulación .....	70
<b>4.3 Parámetros de Configuración para los Escenarios de Simulación .....</b>	<b>71</b>
<b>4.3. Ejecución de las Simulaciones .....</b>	<b>72</b>
<b>4.4 Análisis de Resultados .....</b>	<b>72</b>
4.4.1 Simulación caso 1 y 2, Sub caso 1 .....	72
4.4.2 Simulación caso 1 y 2, Sub caso 2 .....	77
4.4.3 Simulación caso 1 y 2, Sub caso 3 .....	78
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>87</b>
<b>5.1 Conclusiones .....</b>	<b>87</b>
<b>5.2 Recomendaciones .....</b>	<b>88</b>
<b>5.3 Trabajos Futuros.....</b>	<b>89</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>90</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. 1 ENFOQUE DEL TRABAJO DE GRADO. ....	16
FIGURA 2. 1 ESTRUCTURA DE UN SISTEMA DWDM.....	20
FIGURA 2. 2 TIEMPOS PARA EL ENVÍO DE LA RÁFAGA.....	23
FIGURA 2. 3 DIAGRAMA FUNCIONAL DE OBS/DWDM. MODIFICADO DE [6].....	23
FIGURA 2. 4 NODO OBS/DWDM. MODIFICADO DE [6].....	24
FIGURA 2. 5 RESERVA DE RECURSOS DE LA RED PARA LA TRASMISIÓN DE LA RÁFAGA. TOMADA DE [29].....	25
FIGURA 2. 6 DISTRIBUCIÓN NODO BORDE Y NODO CONMUTACIÓN. MODIFICADO DE [26]. ....	26
FIGURA 2. 7 ARQUITECTURA NODO BORDE DE INGRESO. TOMADA DE [7]. ....	27
FIGURA 2. 8 INTERRELACIÓN ENTRE EL TIEMPO DE OFFSET Y EL TAMAÑO DE RÁFAGA. TOMADO DE [7].....	28
FIGURA 2. 9 ALGORITMOS DE ENSAMBLE POR TIEMPO Y LONGITUD DE RÁFAGA. TOMADA DE [7]. ....	31
FIGURA 2. 10 ESQUEMA FUNCIONAL DEL PROTOCOLO JET. TOMADO DE [5]. ....	33
FIGURA 2. 11 FUNCIONAMIENTO DEL ALGORITMO HORIZONTE DE PLANIFICACIÓN. TOMADA DE [25].....	35
FIGURA 2. 12 RED COST239. TOMADA DE [38].....	37
FIGURA 2. 13 CICLO DE RADIO COGNICIÓN. MODIFICADO DE [41]. ....	39
FIGURA 2. 14 ARQUITECTURA DE LAS REDES ÓPTICAS COGNITIVAS. MODIFICADO DE [46].....	41
FIGURA 2. 15 CLASIFICACIÓN DE LAS METAHEURÍSTICAS. TOMADA DE [10].....	43
FIGURA 2. 16 MODELO GENÉRICO DE NEURONA ARTIFICIAL. TOMADA DE [52]. ....	48
Figura 3. 1 Siete pasos para la realización de un estudio de simulación exitoso. Modificado de [54]. ....	52
FIGURA 3. 2 JERARQUÍA DEL SIMULADOR OMNET++. TOMADA DE [20]. ....	54
FIGURA 3. 3 DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO. POR LOS AUTORES. ....	60
FIGURA 3. 4 MODULO NODO FRONTERA EN LA IDE OMNET++.....	61
FIGURA 3. 5 FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE UNA DISTRIBUCIÓN EXPONENCIAL. TOMADA DE [58]. ....	62
FIGURA 3. 6 DENSIDAD DE PROBABILIDAD ALREDEDOR DE LA MEDIA EN UNA DISTRIBUCIÓN $N(\mu, \sigma^2)$ . TOMADA DE [58]. ....	62
FIGURA 3. 7 ARQUITECTURA DE LA RED MLP. TOMADA DE [61] ....	64
FIGURA 3. 8 ARQUITECTURA DE MLP. TOMADA DE [62].....	65
FIGURA 3. 9 MODELO DE LA RED HMCNA.....	67
FIGURA 3. 10 DIAGRAMA DE FLUJO QUE DESCRIBE EL FUNCIONAMIENTO DE HMCNA. POR LOS AUTORES.....	67
FIGURA 3. 11 RED EON OBS/DWDM IMPLEMENTADA. ....	68
FIGURA 4. 1 ENTRENAMIENTO DE LA RED OBS/DWDM CON EL ALGORITMO HMCNA PARA TRÁFICO ALTO.....	73
FIGURA 4. 2 VALIDACIÓN DEL ENTRENAMIENTO DE LA RED OBS/DWDM CON EL ALGORITMO HMCNA PARA TRÁFICO ALTO .....	73
FIGURA 4. 3 PRUEBA DEL ENTRENAMIENTO DE LA RED OBS/DWDM CON EL ALGORITMO HMCNA PARA TRÁFICO ALTO. ....	74



<i>FIGURA 4. 4 PROBABILIDAD DE BLOQUEO PARA UN TRÁFICO ALTO</i> .....	75
<i>FIGURA 4. 5 RETARDO EXTREMO A EXTREMO PARA UN TRÁFICO ALTO.</i> .....	76
<i>FIGURA 4. 6 PROBABILIDAD DE BLOQUEO PARA UN TRÁFICO MEDIO</i> .....	77
<i>FIGURA 4. 7 RETARDO EXTREMO A EXTREMO PARA UN TRÁFICO MEDIO.</i> .....	77
<i>FIGURA 4. 8 PROBABILIDAD DE BLOQUEO PARA UN TRÁFICO BAJO.</i> .....	79
<i>FIGURA 4. 9 RETARDO EXTREMO A EXTREMO PARA UN TRÁFICO BAJO.</i> .....	79
<i>FIGURA 4. 10 EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN EN LA RED SIN EL ALGORITMO HMCNA.</i> .....	80
<i>FIGURA 4. 11 EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DE TRANSMISIÓN EN LA RED CON EL ALGORITMO HMCNA.</i> .....	81
<i>FIGURA 4. 12 RETARDO EXTREMO A EXTREMO DE LA RED CON TRÁFICO ALTO – 3D</i> .....	82
<i>FIGURA 4. 13 RETARDO EXTREMO A EXTREMO DE LA RED CON TRÁFICO MEDIO – 3D.</i> .....	82
<i>FIGURA 4. 14 RETARDO EXTREMO A EXTREMO DE LA RED CON TRÁFICO BAJO – 3D</i> .....	83
<i>FIGURA 4. 15 RETARDO EXTREMO A EXTREMO CON TRÁFICO ALTO – LINEAL</i> .....	83
<i>FIGURA 4. 16 RETARDO EXTREMO A EXTREMO CON TRÁFICO MEDIO – LINEAL.</i> .....	84
<i>FIGURA 4. 17 RETARDO EXTREMO A EXTREMO CON TRÁFICO BAJO – LINEAL.</i> .....	84



## ÍNDICE DE TABLAS

<i>TABLA 2. 1. COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE CONMUTACIÓN ÓPTICA. MODIFICADO DE [4].</i> .....	22
<i>TABLA 3. 1. PARAMETRIZACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN. ADAPTADA DE [55].</i> ...	55
<i>TABLA 3. 2 PARÁMETROS DE LA RED.</i> .....	68
<i>TABLA 4. 1 ESCENARIO Y CASOS DE SIMULACIÓN.</i> .....	71
<i>TABLA 4. 2 VARIABLES CONFIGURADAS PARA EL ENLACE DE COMUNICACIÓN DE LA RED.</i> .....	71
<i>TABLA 4. 3 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS.</i> .....	72
<i>TABLA 4. 4 COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS DE SIMULACIÓN.</i> .....	85



## LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>ACK</b>	<i>Acknowledgement</i> , Confirmación de recepción.
<b>ACO</b>	<i>Ant Colony Optimization</i> , Optimización basada en Colonia de Hormigas.
<b>ANN</b>	<i>Artificial Neural Networks</i> , Redes Neuronales Artificiales.
<b>ANNPSOA</b>	<i>Artificial Neuronal Network-Particle Swarm Optimization Algorithm</i> , Algoritmo Red Neuronal Artificial- Optimización por Enjambre de Partículas.
<b>AP</b>	<i>Application Layer</i> , Capa de Aplicación.
<b>BCP</b>	<i>Burst Control Packet</i> , Paquete de Control de Ráfaga.
<b>BW</b>	<i>Band Width</i> , Ancho de Banda.
<b>CN</b>	<i>Cognitive Network</i> , Red Cognitiva.
<b>CP</b>	<i>Control Plane</i> , Plano de Control.
<b>CR</b>	<i>Cognitive Radio</i> , Radio Cognitivo.
<b>COST</b>	<i>European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research</i> , Cooperación Europea en campo de la Investigación Científica y Técnica.
<b>DR</b>	<i>Delay Reservation</i> , Reserva con Retardo.
<b>EA</b>	<i>Evolutionary Algorithms</i> , Algoritmos Evolutivos.
<b>EDA</b>	<i>Estimation of Distribution Algorithms</i> , Algoritmos de Estimación de la Distribución.
<b>EON</b>	<i>European Optical Network</i> , Red Óptica Europea.
<b>FDL</b>	Fiber Delay Lines, Líneas de retardo de fibra.
<b>GRASP</b>	<i>Greedy Randomized Adaptative Search Procedure</i> , Procedimiento de Búsqueda Miope Aleatorizado y Adaptativo.
<b>IDE</b>	<i>Integrated Development Environment</i> , Entorno de Desarrollo Integrado
<b>ILS</b>	<i>Iterated Local Search</i> , Búsqueda Local Iterada.
<b>IP</b>	<i>Internet Protocol</i> , Protocolo de Internet.
<b>IPTV</b>	<i>Internet Protocol Television</i> , Televisión por Protocolo de Internet.
<b>JET</b>	<i>Just EnoughTime</i> , Tiempo Suficiente.
<b>JIT</b>	<i>Just In Time</i> , Justo a Tiempo.
<b>KP</b>	<i>Knowledge Plane</i> , Plano de Conocimiento.
<b>LAUC</b>	<i>Lastest Available Unsheduled Channel</i> , Último Canal Disponible sin Planificación.
<b>MAC</b>	<i>Medium Access Control</i> , Control de Acceso al Medio.
<b>MLP</b>	<i>Multi Layer Perceptron</i> , Perceptrón MultiCapa.
<b>NNTool</b>	<i>Neural Network Toolbox</i> , Herramienta para Red Neuronal.





<b>NP- Completo</b>	<i>Non deterministic Polynomial Time</i> , Tiempo Polinomial no Determinístico.
<b>OBS/DWDM</b>	<i>Optical Burst Switching</i> , Conmutación Óptica de Ráfagas.
<b>OCS</b>	<i>Optical Circuit Switching</i> , Conmutación Óptica de Circuitos.
<b>OPS</b>	<i>Optical Packets Switching</i> , Conmutación Óptica de Paquetes.
<b>PSO</b>	<i>Particle Swarm Optimization</i> , Optimización basada en Enjambre de Partículas.
<b>QoS</b>	<i>Quality of Service</i> , Calidad del Servicio.
<b>SA</b>	<i>Simulated Annealing</i> , Enfriamiento Simulado.
<b>SCU</b>	<i>Switch Control Unit</i> , Unidad de Control de Conmutación.
<b>SP</b>	<i>Service Plane</i> , Plano de Servicio.
<b>SS</b>	<i>Scatter Search</i> , Búsqueda Dispersa.
<b>TAG</b>	<i>Tell And Go</i> , Avisar y Seguir.
<b>TAW</b>	<i>Tell And Wait</i> , Avisar y Esperar.
<b>TCP/IP</b>	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i> , Protocolo de Control de Transmisión/Protocolo de Internet.
<b>TDM</b>	<i>Time Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Tiempo.
<b>TS</b>	<i>Tabu Search</i> , Búsqueda de Tabú.
<b>VNS</b>	<i>Variable Neighborhood Search</i> , Búsqueda con Vecindario Variable.
<b>WAN</b>	<i>Wide Area Network</i> , Red de Área Amplia.
<b>WDM</b>	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Longitud de onda.
<b>WWW</b>	<i>World Wide Web</i> , Red informática mundial.



Análisis de desempeño de una red OBS/DWDM distribuida mediante la integración de un método cognitivo basado en metaheurística híbrida para el ensamble de ráfagas  
Juan Camilo Bravo Flórez – Juan David Prado López

---



## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1 Planteamiento del problema

Las telecomunicaciones<sup>1</sup> desde sus inicios han estado en un constante crecimiento y evolución. Se está en una era donde la comunicación es vital para el ser humano, ya sea para funciones sencillas como poder acortar distancias entre personas que están geográficamente lejanas o entre procesos complejos como transferencias de dinero que sean completamente seguras, asuntos de trabajo entre empresas en diferentes países, entre otros aspectos que le permiten a las personas hacer su vida un poco más sencilla a la hora de comunicarse.

Todos estos requerimientos necesitan de un gran ancho de banda<sup>2</sup>, y cada vez los usuarios exigen más y más velocidad. Es por esto, que para poder soportar nuevos y mejores servicios, se debe tener una red que permita transportar altas cantidades de información en tiempos muy reducidos. Inicialmente los anchos de banda eran demasiado limitados y las velocidades de transferencia<sup>3</sup>, bajas, pero en la actualidad se han llegado a velocidades del orden de los terabits<sup>4</sup> e incluso de los petabits<sup>5</sup> por segundo.

Estas velocidades, junto con el crecimiento exponencial de los usuarios que hacen uso de dichas redes de datos [1], requieren forzosamente migrar de infraestructura hacia nuevas tecnologías que soporten todos los nuevos servicios, ofrezcan una alta Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*) y su costo no sea elevado [2].

Es por esto que las redes ópticas se convierten en una solución viable y en la actualidad es la única infraestructura que permite transportar grandes cantidades de información a muy altas velocidades. Esto debido esencialmente a que cuenta con la fibra óptica como soporte físico o medio de transmisión.

Por tanto, dadas las características con las que cuenta la fibra óptica y la demanda de tráfico de información que se mencionó anteriormente, se requiere

---

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

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

<sup>3</sup> Se define como la rapidez con la que se pueden comunicar dos dispositivos digitales mediante un sistema dado de transmisión de datos

<sup>4</sup> Unidad de información o almacenamiento del orden de  $10^{12} \text{ bits}$

<sup>5</sup> Unidad de información o almacenamiento del orden de  $10^{15} \text{ bits}$



de un tipo de multiplexación adecuado a dichos requerimientos, donde la multiplexación por división de longitud de onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*) [3] [4] es la opción más adecuada ya que permite llevar sobre un mismo hilo de fibra óptica, varios canales de información mediante la implementación de granularidad óptica a nivel de longitudes de onda.

Teniendo en cuenta lo anterior, para poder transportar estos grandes volúmenes de información, se requiere de técnicas de conmutación apropiadas al medio de transmisión en cuestión que permitan transmitir de manera eficiente la información, tales como la Conmutación Óptica de Circuitos (OCS, *Optical Circuit Switching*), Conmutación Óptica de Paquetes (OPS, *Optical Packet Switching*) y Conmutación Óptica de Ráfagas (OBS/DWDM, *Optical Burst Switching*), donde esta última, es una combinación de las primeras dos técnicas en la cual se agrupan las mejores características de cada una de ellas, características tales como la gran ocupación espectral de su ancho de banda, la no necesidad de un almacenamiento óptico, baja latencia, alta adaptabilidad, entre otros distintivos, hacen de esta tecnología una excelente opción en la conmutación óptica de las redes de telecomunicaciones. [5]

Dado que en OBS/DWDM la información se transporta en ráfagas, es de suma importancia contar con técnicas que permitan un eficiente y eficaz ensamble de ráfagas en los nodos frontera (*Edge Node*), donde estas técnicas pueden estar basadas en la longitud de la ráfaga a la cual, se le asigna un umbral de paquetes de datos para poder ser enviada a la red; basadas en tiempo, donde la ráfaga se crea y envía a la red en intervalos de tiempo periódicos [6]; o una combinación de estas dos técnicas, donde se debe contar con una longitud y un tiempo óptimo para ensamblar las ráfagas que posteriormente van a ser enviadas al interior de la red OBS/DWDM.

La definición de un tamaño adecuado de la ráfaga tiene una incidencia determinante en el desempeño de la red OBS/DWDM [7], por lo tanto es deseable obtener un tiempo de ensamble o un umbral de longitud de ráfaga adecuado para contribuir a mejorar el comportamiento de la red en cuanto probabilidad de bloqueo o disminución de los retardos extremo a extremo.

Debido a lo anterior, se busca que mediante el empleo de metaheurísticas<sup>6</sup> se puedan encontrar valores cercanos a los óptimos para el tiempo de ensamble y

---

<sup>6</sup> Es un método heurístico para resolver un tipo de problema computacional general



umbral de longitud de ráfaga y de esta manera, ayudar a mejorar el comportamiento de la red OBS/DWDM distribuida.

Surge la siguiente pregunta de investigación que busca resolver el desarrollo del presente trabajo de grado: ¿Qué incidencia presenta en el desempeño de una red OBS/DWDM distribuida el integrar un método cognitivo basado en metaheurísticas híbridas en el submódulo de ensamble de ráfagas en los nodos de borde?

## 1.2 Escenario de motivación

En la actualidad se usan las redes de comunicación ópticas como medio idóneo para la transmisión de un gran tráfico, basado principalmente el Protocolo Internet (IP, *Internet Protocol*) generado por la gran cantidad de usuarios conectados a causa de la denominada *Sociedad de la Información*<sup>7</sup>. Para soportar todo este tráfico, las redes de fibra óptica basan su funcionamiento en tecnologías que permiten multiplexar la información a través de diferentes longitudes de onda, cuyo medio de transmisión son los hilos de fibra. De la misma manera se ha hecho necesario el desarrollo de nuevos dispositivos para el procesamiento de la información en el dominio óptico, lo cual minimiza el tiempo de procesamiento de estos sistemas de comunicación. No obstante, aunque las redes ópticas presentan ventajas con respecto al gran ancho de banda que ofrece, este no es ilimitado por lo se ha hecho necesario el estudio de métodos de conmutación de la fibra que mejoren cada vez más las velocidades de transmisión cumpliendo con unos criterios de calidad de servicio.

En este orden de ideas, la conmutación por ráfagas OBS/DWDM, en su módulo de ensamble de ráfagas está catalogado como un problema de Tiempo Polinomial no Determinístico Completo (NP- Completo, *Non deterministic Polynomial Time*) [8][9] lo que dificulta encontrar un algoritmo determinista, por lo que se acude a técnicas metaheurísticas para modelar el ensamble debido a las ventajas que estas ofrecen con respecto a la robustez, escalabilidad y convergencia hacia el óptimo global esperado en este caso para las redes ópticas. De igual manera, a dichas técnicas metaheurísticas se les busca

---

<sup>7</sup> La sociedad de la información es aquella en la cual las tecnologías que facilitan la creación, distribución y manipulación de la información juegan un papel esencial en las actividades sociales, culturales y económicas



implementar métodos cognitivos que les permitan observar y razonar para la optimización de estas redes.

En conclusión, en el presente documento final de trabajo de grado, se tiene como objeto de estudio la aplicación de un método cognitivo basado en una metaheurística híbrida que ayude en el proceso de ensamble de ráfagas de la tecnología de conmutación óptica por ráfagas. Igualmente se estudia la estructura de una red óptica conmutada por ráfagas con el fin de lidiar con la creciente demanda de recursos de red, gestionándolos adecuadamente

### **1.3 Objetivos**

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

#### **1.3.1 Objetivo General**

- Analizar el desempeño de una red OBS/DWDM distribuida al Integrar un método cognitivo basado en metaheurísticas híbridas en el submódulo de ensamble de ráfagas en los nodos de borde.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Identificar y seleccionar metaheurísticas híbridas que mejor se puedan adaptar en los procesos de ensamblaje de ráfagas.
- Adaptar las metaheurísticas híbridas seleccionadas insertando un método cognitivo para el ensamble de ráfagas.
- Evaluar la incidencia del método cognitivo basado en la Metaheurística seleccionada sobre el desempeño de la Red Óptica Europea (EON, *European Optical Network*) OBS/DWDM de prueba mediante el uso del IDE OMNeT++ versión académica.

### **1.4 Enfoque**

Para el desarrollo del presente trabajo de grado se hizo un estudio bibliográfico de los fundamentos de las redes OBS/DWDM, desde su origen, su funcionalidad, hasta su implementación. Adicional a esto, se llevó a cabo una investigación con especial cuidado del proceso de ensamble de ráfagas, donde se encontró que estas se pueden conformar en tiempo de ensamble y/o longitud de la ráfaga. De igual manera se encontraron diferentes metaheurísticas [10] [12] [13] y métodos de control



cognitivo, los cuales al ser aplicados al proceso de ensamble de ráfagas pueden mejorar el desempeño de la red.

Posterior a esto, y tomando como base el estudio bibliográfico realizado se seleccionaron las metaheurísticas más adecuadas para el proceso de ensamble de ráfagas y se definieron los parámetros que caracterizan a la red EON, para la generación del modelo de simulación implementado en la herramienta OMNeT++.

Finalmente se realiza la evaluación del desempeño de la red, ejecutando la simulación con y sin la implementación de la metaheurística híbrida para el proceso de ensamble de ráfagas.

Para tener más claridad en el enfoque, la *Figura 1* permite visualizar de manera general, el proceso que llevó a cabo para desarrollar el objetivo general del presente trabajo de grado.

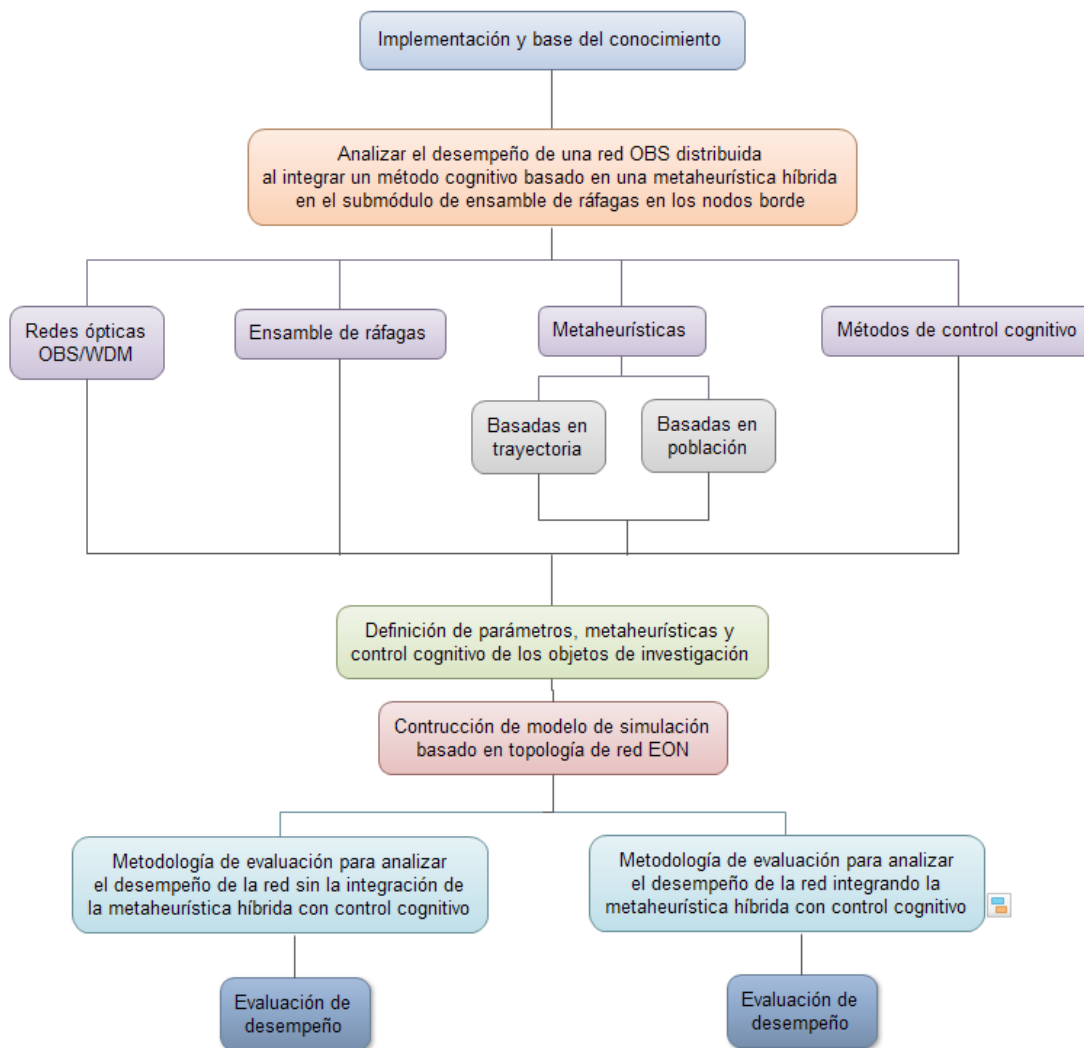


Figura 1. 1 Enfoque del trabajo de grado.

## 1.5 Alcance

En el presente documento se explica cómo se realizó el proceso de diseño y obtención de los modelos de comportamiento y simulación de la red óptica OBS/DWDM EON, la red de área amplia (WAN, *Wide Area Network*) que cubre Europa denominada COST239 (*Ultra-High Capacity Optical Transmission Networks*), la cual promueve la investigación y desarrollo de la industria, universidades y centros de investigación de la principales ciudades de Europa [14] con topología híbrida o irregular que consta de once nodos, 26 enlaces bidireccionales cuyo enlace más corto es de 210 km y el más largo de 1310 km. Por cada enlace se cuenta con dieciséis longitudes de onda en donde cada una de estas cuenta con una capacidad de 10Gbps. Esta red europea utiliza





enrutamiento y asignación de longitudes de onda para conectar todos sus nodos [15].

Para este trabajo de grado, se tuvieron dos escenarios de estudio en la red OBS/DWDM EON. El primero de estos es la red sin la implementación de metaheurísticas ni control cognitivo y el segundo, con la implementación de un control cognitivo basado en una metaheurística híbrida para el ensamble de la ráfaga, para de esta manera, observar el comportamiento de la misma al aplicarle dichos métodos de optimización y cognición.

## 1.6 Aportes

El trabajo de grado está enfocado en las líneas de investigación del Grupo de Investigación y desarrollo Nuevas Tecnologías de Telecomunicaciones (GNTT) y en las áreas de interés de Sistemas de Comunicaciones ópticas. Los aportes del trabajo de grado son:

- Análisis detallado sobre el estudio y aplicación de metaheurísticas híbridas a procesos de ensamble de ráfagas en redes ópticas, específicamente la red EON.
- Método cognitivo implementado basado en metaheurísticas híbridas para la evaluación del desempeño de redes OBS/DWDM distribuidas.
- Análisis del impacto que tiene sobre una red OBS/DWDM la implementación o no de un método cognitivo basado en una metaheurística híbrida.
- Evaluación del desempeño de las redes ópticas OBS/DWDM con o sin la implementación de un método cognitivo basado en una metaheurística híbrida, mediante la estimación de parámetros como probabilidad de bloqueo y tiempo de procesamiento.

## 1.7 Contenido del documento final

- **Capítulo 2:** Estado del arte.

En este capítulo se incluye una conceptualización teórica de cada uno de los aspectos técnicos, los cuales facilitarán la comprensión del presente trabajo de grado. Igualmente se incluyen definiciones claras sobre metaheurísticas, redes ópticas cognitivas, ensamble de ráfagas y redes OBS/DWDM, son



algunos de los temas que aborda el trabajo de grado. Adicional a esto se brinda una contextualización del estado actual de desarrollo científico del tema a abordar en la presente monografía.

- **Capítulo 3:** Implementación de los módulos de la red.

En este capítulo se describe el proceso de implementación de la red EON en el simulador OMNeT++, especificando cada uno de los módulos usados para el diseño de la red óptica OBS/DWDM y la implementación del algoritmo de control cognitivo basado en una metaheurística híbrida para el submódulo de ensamble de ráfagas.

- **Capítulo 4:** Análisis del desempeño de la red OBS/DWDM distribuida basada en metaheurísticas híbridas con y sin métodos de control cognitivo.

En este capítulo se plasman los resultados de simulación que se obtuvieron en la red óptica OBS/DWDM al aplicar metaheurísticas con y sin métodos de cognición para el ensamble de ráfagas en dicha red. La evaluación del impacto que se tiene el aplicar estas técnicas, se realiza mediante el análisis de la probabilidad de bloqueo y retardos extremo a extremo.

- **Capítulo 5:** Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

Este capítulo contiene las conclusiones extraídas de acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado, recomendaciones y propuestas de trabajos futuros relacionados con esta tesis.



## CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Introducción a las comunicaciones ópticas

Desde los inicios del Internet a finales de los años 60 cuando se transmitió un mensaje a través de la red denominada ARPANET entre las universidades de UCLA y Stanford, en Estados Unidos, marcando un hito<sup>8</sup> en la historia de las telecomunicaciones y a su vez, un punto de partida de las comunicaciones globales, la misma que daría inicio a finales de los años 90 a la creación de clientes web denominados (*WWW, World Wide Web*) con su respectivo servidor web<sup>9</sup> [16]. A partir de este suceso, el mundo siguió avanzando generando un aumento significativo del número de personas conectadas y así mismo una creciente demanda de ancho de banda debido al surgimiento de una gran variedad de aplicaciones que requieren altas tasas de transmisión como la telefonía basada en IP, video conferencias en tiempo real, juegos en línea, Televisión por Protocolo de Internet (*IPTV, Internet Protocol Television*) entre otras aplicaciones.

Uno de los principales avances tecnológicos en medios de transmisión de datos que ha solucionado en parte este crecimiento de demanda de recursos es el desarrollo de la fibra óptica, debido a que mediante esta se pueden transmitir gran cantidad de información en forma de luz por medio de filamentos de fibra de vidrio o plástico con diferentes índices de refracción, razón por la cual la luz que se introduce a estos hilos, se mantiene y se propaga a través del núcleo con una baja atenuación<sup>10</sup> mediante el fenómeno denominado reflexión interna total [17], esto permite alcanzar una mayor distancia en el enlace, inmunidad electromagnética y un gran ancho de banda disponible, logrando alcanzar velocidades de transferencia del orden de los Terabits por segundo.

En las telecomunicaciones se ha hecho necesario la implementación de técnicas de multiplexación<sup>11</sup> que optimicen los recursos que tiene la red maximizando el ancho de banda disponible en ésta [18]. En las comunicaciones ópticas se usa la multiplexación por división de longitud de onda DWDM. Esta tecnología asigna diferentes longitudes de onda a cada uno de los canales para ser transmitidos sobre un solo hilo de fibra óptica a través de multiplexores y demultiplexores ópticos, los cuales separan espacialmente las longitudes de onda de la señal de entrada para

---

<sup>8</sup> Acontecimiento muy importante y significativo en el desarrollo de un proceso

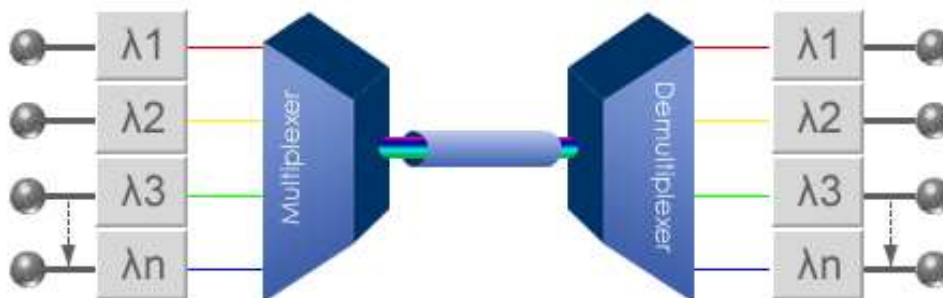
<sup>9</sup> Es un aplicación que genera conexiones bidireccionales y/o unidireccional entre el cliente y la red

<sup>10</sup> Pérdida de potencia de la señal al transitar por cualquier medio de transmisión

<sup>11</sup> Conjunto de técnicas que permite la transmisión simultánea de múltiples señales a través de un único enlace de datos



ser transmitidas sobre un único hilo de fibra para su posterior proceso de demultiplexación [19]. En la *Figura 2. 1* se muestra la estructura de DWDM.



*Figura 2. 1 Estructura de un sistema DWDM*

## 2.2 Conmutación Óptica

En las redes ópticas se definen tres técnicas de conmutación: Conmutación Óptica de Circuitos OCS, Conmutación Óptica de Paquetes OPS y Conmutación Óptica de Ráfagas OBS/DWDM [20]. Estas tecnologías de conmutación basan su funcionamiento en el encaminamiento de la información a través de la red, haciendo un uso eficiente de los recursos de esta, tales como ancho de banda y longitudes de onda disponibles. En la conmutación se distinguen dos tipos: la conmutación física, la cual direcciona el flujo de datos de un puerto de entrada a un puerto de salida y la conmutación lógica, que es la forma en la cual viaja la información a través de la red (circuitos, paquetes o ráfagas) [21], las cuales se describen con más detalle a continuación, enfatizando en OBS/DWDM, tema central de la presente monografía.

### 2.2.1 Conmutación Óptica de Circuitos OCS

Es un tipo de conmutación en el cual la red se configura con el establecimiento de un circuito entre el nodo de entrada hasta el nodo destino en forma óptica mediante un enlace extremo a extremo (*end-to-end*) denominado *lightpath*, en donde se ejecuta el enrutamiento, toda la información es transmitida con la necesidad de ejecutar conversiones E/O y O/E<sup>12</sup> en los nodos ingreso y destino respectivamente para ejecutar un procesamiento de la información. Esta tecnología se caracteriza por ser orientada a conexión, es decir, necesita de un establecimiento previo del *lightpath* para poder transmitir y de la misma manera una vez termine la transmisión de información se hace necesario liberar el enlace para que otros nodos puedan

<sup>12</sup> Para transmitir haces de luz a través de un tendido de fibra se requiere de conversores Optico-Elctrico y Elctrico-Optico en el receptor y emisor respectivamente



transmitir la información, lo que hace que presente un uso ineficiente del ancho de banda. [22]

### **2.2.2 Conmutación Óptica de Paquetes OPS**

La conmutación óptica de paquetes basa su funcionamiento en el enrutamiento de paquetes IP<sup>13</sup> basadas en WDM pero sin conversiones O/E/O [23], en donde se hace necesario un switch óptico<sup>14</sup> como elemento conmutador de paquetes y dispositivos de almacenamiento de paquetes ópticos en cada uno de los nodos intermedios de la red. Cada uno de estos paquetes está compuesto por una carga útil<sup>15</sup> y una cabecera óptica<sup>16</sup>, los cuales son utilizados para ejecutar un enrutamiento en el dominio óptico de los paquetes a través de interfaces de entrada ubicadas en cada uno de los nodos intermedios, cuya labor es: extraer la cabecera del paquete óptico y enviarla a la unidad de control de procesamiento para su posterior asignación de un puerto de salida y longitud de onda, para conmutar cada uno de los paquetes hacia el nodo frontera [24].

### **2.2.3 Conmutación Óptica de Ráfagas OBS/DWDM**

La conmutación óptica de ráfagas OBS/DWDM, es una tecnología que emplea WDM para establecer los enlaces entre los nodos, la cual radica el punto medio entre el enrutamiento de longitud de onda o OCS y OPS. Esta red OBS/DWDM, contiene múltiples paquetes IP que se conmutan en un medio completamente óptico y se transmiten en forma de ráfagas. En la *Tabla 2.1* se ilustra una comparación entre los diferentes sistemas de conmutación ópticos disponibles en la actualidad.

---

<sup>13</sup> Paquete de red en el que se envía la información con un protocolo de internet para la comunicación de datos digitales

<sup>14</sup> Dispositivo de características digitales que se necesita para interconectar redes ópticas

<sup>15</sup> Conjunto de datos que representan la información del usuario

<sup>16</sup> Campo de datos que almacena la información de señalización de una transmisión óptica.



Tabla 2. 1. Comparación de los diferentes sistemas de conmutación óptica. Modificado de [4].

Paradigma Conmutación Óptica	Utilización de Ancho de Banda	Latencia de Conf.	Velocidad de conmutación	Procesador/Sincronismo Cabecera (por unidad de datos)	Adaptabilidad de tráfico
Conmutación Óptica de Circuitos	Baja	Alta	Baja	Baja	Baja
Conmutación Óptica Paquetes	Alta	Baja	Rápido	Alta	Alta
Conmutación Óptica Ráfagas	Alta	Baja	Medio	Bajo	Alta

De la *Tabla 2.1* se puede analizar los tres paradigmas de conmutación óptica desde diferentes aspectos. La conmutación óptica por ráfagas es capaz de superar problemas como la utilización de ancho de banda, latencia de configuración y adaptabilidad de tráfico<sup>17</sup> presentes en la conmutación óptica de circuitos, además a esto, mejora un poco la velocidad de conmutación de las redes pero tiene problemas de sincronización y procesamiento de los datos debido al cuello de botella que se genera en cada nodo intermedio, problema que se describirá más adelante con mayor detalle.

### 2.2.3.1 Arquitectura de red

La arquitectura de una red OBS/DWDM está compuesta fundamentalmente por dos elementos a saber, los Nodos de Frontera o Borde (*Edge Node*) y los Nodos de Núcleo (*Core Node*). Dentro de los nodos de borde se encuentran los nodos de ingreso y los nodos de egreso. En los primeros se realiza el proceso de transmisión y ensamble de las ráfagas mientras que en los últimos ocurre el proceso complementario de desensamble. En los nodos de núcleo se realizan los procesos de conmutación óptica mediante multiplexores y demultiplexores y una unidad de control que procesa los paquetes de control de la ráfaga. En la *Figura 2.2* se observan los tiempos para el envío del BCP y de la ráfaga.

En la *Figura 2.3* observa el diagrama de funcionalidades de una red OBS/DWDM, iniciando con los procesos del nodo frontera los cuales constan del ensamble de las ráfagas, el enrutamiento, asignación de longitud de onda y la sincronización de la

<sup>17</sup> Es la capacidad que tienen las redes para ajustar sus propiedades dependiendo del tráfico que circula a través de ellas



ráfaga en la frontera de la red. Seguido de esto se encuentran las funciones del nodo central, que es el encargado de la señalización<sup>18</sup>, conmutación de las ráfagas y la resolución de contiendas. Finalmente, en el nodo frontera de salida se tiene el desensamble de las ráfagas y el envío de los paquetes a las capas superiores.

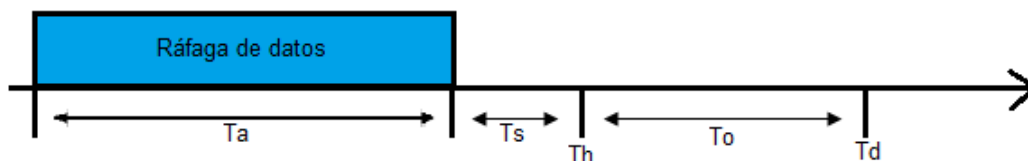


Figura 2. 2 Tiempos para el envío de la ráfaga

Donde,

$T_a$ : Tiempo de ensamble de la ráfaga.

$T_h$ : Tiempo de envío del BCP.

$T_d$ : Tiempo de envío de la ráfaga de datos.

$T_o$ : Tiempo de offset.

$T_s$ : Tiempo de planificación.

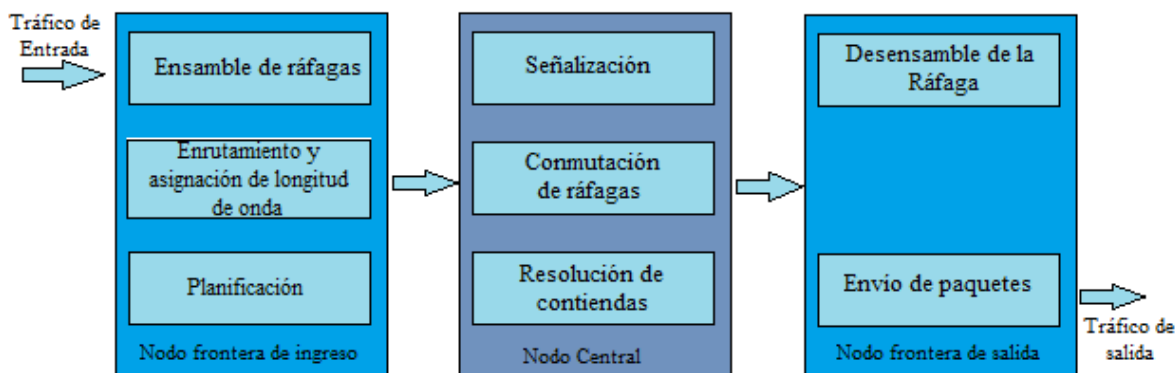


Figura 2. 3 Diagrama funcional de OBS/DWDM. Modificado de [6].

### 2.2.3.2 Funcionamiento OBS/DWDM

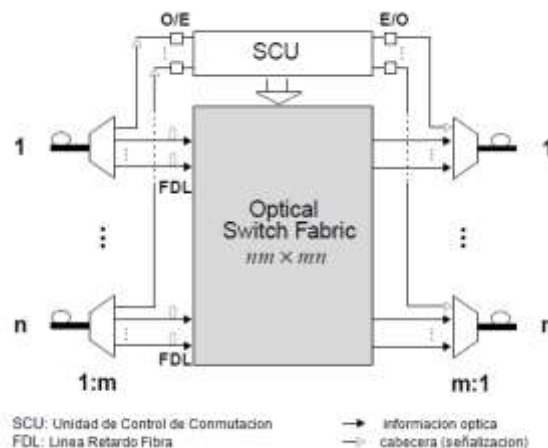
Una ráfaga es una agrupación de paquetes que se dirigen hacia un mismo destino con características de prioridad y calidad [25] definidas, en donde la transmisión de cada ráfaga está precedida de los Paquetes de Control de Ráfagas (BCP, *Burst Control Packet*), cada uno de los nodos intermedios los convierten al dominio eléctrico para poder procesarlos en la Unidad de Control de Conmutación (SCU, *Switch Control Unit*) y las ráfagas de datos en el dominio óptico en diferentes

<sup>18</sup> Es el proceso de generación y manejo de información e instrucciones necesarias para el establecimiento de conexiones.





longitudes de onda. En la *Figura 2. 4* se muestra un nodo OBS/DWDM, en el cual se puede apreciar los enlaces separados de los canales de control e información, cada uno con su respectiva longitud de onda asignada, la SCU y la matriz de conmutación óptica. El SCU define los criterios de decisión que se consideran para realizar el enrutamiento y ensamble de ráfagas, en el cual se guarda la información de control decodificada de las cabeceras de las ráfagas para ser enviados al siguiente nodo después de realizar la conversión E/O [26]. Como se mencionó anteriormente cada una de estas ráfagas de datos se transmiten sobre una longitud de onda diferente a la de los BCP, para así poder reservar recursos de ancho de banda tal y como se realiza en la Multiplexación por División de Tiempo (TDM, *Time Division Multiplexing*) [27]. Los paquetes de control le informan a la red el flujo de información que transita sobre ella en forma de ráfaga para que esta, pueda conmutar la ráfaga hacia el nodo destino o frontera, cada uno de estos nodos de frontera se conectan con la red mediante un enlace de fibra óptica que soporta múltiples longitudes de onda a las cuales se les asignan las ráfagas [28].



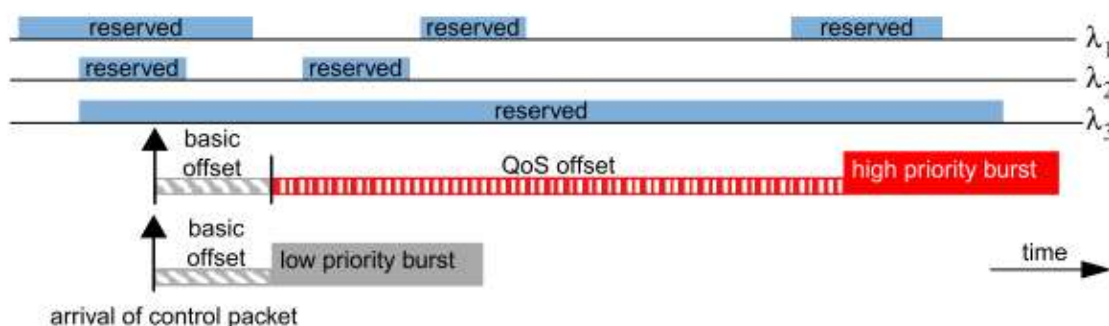
*Figura 2. 4* Nodo OBS/DWDM. Modificado de [6].

Las ráfagas en una red OBS/DWDM no esperan a la confirmación del establecimiento del enlace de comunicación *end-to-end*, esta comienza a transmitir la información una vez haya transcurrido el *tiempo offset*, el cual especifica la duración de la ráfaga e informa el momento en el que el nodo debe reconfigurarse para la recepción de una nueva ráfaga [6]. Este *tiempo offset* se calcula mediante la suma de cada uno de los tiempos de conmutación de cada nodo intermedio, en donde se tienen en cuenta las conversiones O/E y E/O, el procesamiento de los BCP, el tiempo de respuesta de la matriz de conmutación, el análisis de la distancia más corta en el enlace *end-to-end*, es decir, atravesar el mínimo número de nodos intermedios en el enlace de





comunicaciones y el factor de velocidad de propagación<sup>19</sup> de cada longitud de onda. En la *Figura 2. 5* se aprecia el mecanismo de transmisión y conmutación de los recursos, como el paquete de control BCP solicita una longitud de onda de la red para transmitir los datos, la red asigna un tiempo offset según la prioridad de la ráfaga y así poder ejecutar el procesamiento del paquete de control y configurar la matriz de conmutación<sup>20</sup> para transmitir la ráfaga por cada uno de los saltos hasta llegar al nodo de destino. Cuando la ráfaga llega al nodo de destino este ejecuta la conversión O/E debido a que la matriz de conmutación se encuentra previamente configurada en el dominio óptico [29].



*Figura 2. 5 Reserva de recursos de la red para la transmisión de la ráfaga. Tomada de [29].*

Ahora bien, se define la Ecuación (2.1), la cual permite calcular el *tiempo offset* sin tener en cuenta el factor de velocidad de propagación.

$$\text{tiempo offset} = ((2 * Tco) + Tp) * N \quad (2.1)$$

Donde,

Tco: tiempo de conversión óptica a eléctrica y eléctrica a óptica

Tp: tiempo de procesamiento del BCP

N: número de saltos que debe atravesar la ráfaga

Como ya se explicó anteriormente este tipo de conmutación no cuenta con buffers de almacenamiento por un periodo indefinido de tiempo debido a que se ensamblan y transmiten grandes ráfagas de información, por tanto, en caso de que se presente una colisión entre ráfagas, esta se descarta. El despliegue de este tipo de redes

<sup>19</sup> Es la relación que existe entre la velocidad de propagación de una señal en el tendido de fibra y la velocidad de propagación de la luz en el espacio libre

<sup>20</sup> Arreglo matricial de múltiples entradas y múltiples salidas que permite definir el nodo de frontera al cual se va a enrutar las ráfagas

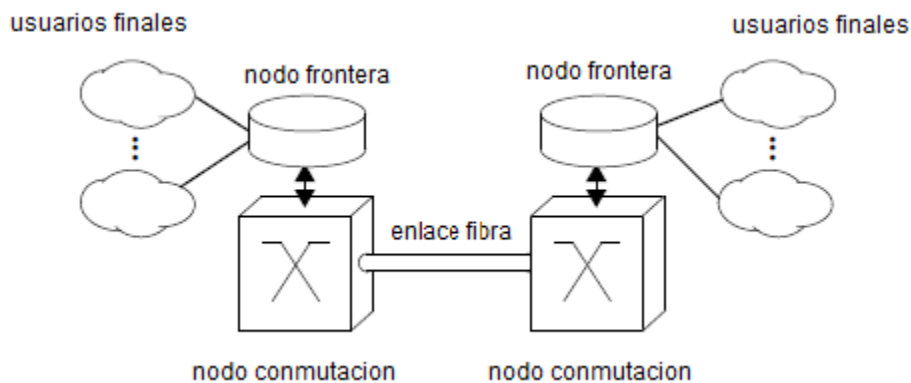


ópticas es muy factible debido a que se reducen los requerimientos de dispositivos de alta tecnología, razón por la cual en la actualidad no ha sido posible el despliegue o implementación de redes OPS, debido a que no se cuenta con tecnología que permita el almacenamiento de luz para la conmutación de paquetes ópticos.

Aunque la conmutación óptica por ráfagas ofrece grandes ventajas sobre la red, se debe tener en cuenta varios aspectos para la implementación de dichas redes. Entre estos problemas incluye los esquemas de señalización, mecanismos de resolución de contienda, programación de la ráfaga, calidad de servicio y ensamble de ráfagas, el último de estos es el tema central del presente trabajo de grado. La dificultad del ensamble de ráfagas en redes OBS/DWDM radica en como incluir muchos paquetes sobre una ráfaga, este se ve afectado por la longitud de la ráfaga y por el tiempo que los paquetes deben esperar para ser transmitidos.

### 2.2.1.1 Nodo de Borde

El nodo de borde o de frontera tiene dos componentes: Nodo de ingreso y de egreso, el primero de estos es el encargado del inicio de la transmisión, donde se lleva a cabo el ensamble de paquetes principalmente IP en ráfagas y la programación de las ráfagas en los canales de longitud de onda de salida [30], mientras que el segundo, el nodo de egreso realiza el desensamble de las ráfagas. En la *Figura 2. 6* se ilustra el esquema de distribución que tienen los nodos de frontera y conmutación con sus respectivos enlaces de comunicaciones para llegar a los usuarios finales.



*Figura 2. 6 Distribución Nodo Borde y Nodo Conmutación. Modificado de [26].*

El nodo borde de ingreso ensambla los paquetes entrantes en ráfagas. Estas son transmitidas en el dominio óptico sobre los enrutadores del núcleo de la red y sin ser almacenadas durante todo el camino hasta llegar a su destino final. El nodo



borde de egreso al recibir la ráfaga, la desensambla en los paquetes correspondientes y estos se envían a su destino. En la *Figura 2. 7* se observa la arquitectura de un nodo borde de ingreso.

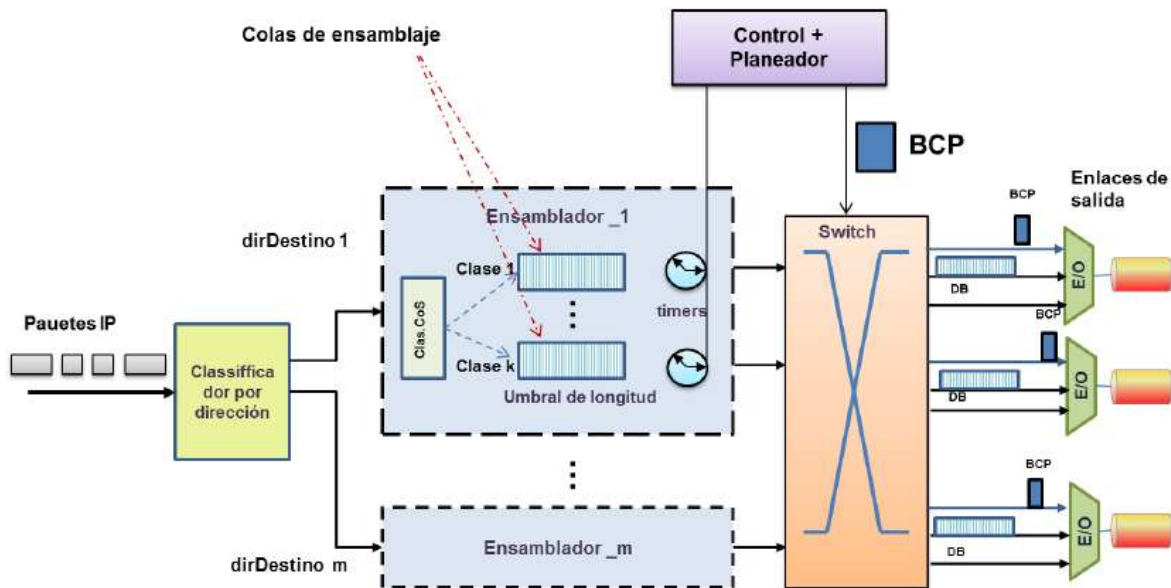


Figura 2. 7 Arquitectura nodo borde de ingreso. Tomada de [7].

El ensamble de las ráfagas es de vital importancia en las redes OBS/DWDM, por lo que requiere de un análisis detallado del mismo. Determinar el tamaño que va a tener la ráfaga es uno de los aspectos más relevantes en el proceso de ensamble y uno de los tópicos principales de este trabajo de grado. A continuación se analiza detalladamente la conformación de las ráfagas en los nodos borde de ingreso.

### 2.2.1.1.1 Conformación de las ráfagas

Como se mencionó anteriormente, una ráfaga es una agrupación de paquetes IP que se dirigen hacia un mismo destino con unas características específicas. La conformación de esta se realiza mediante varias etapas. Inicialmente, los paquetes IP llegan desde diferentes redes externas o desde niveles IP superiores los cuales pueden clasificarse de acuerdo a ciertos lineamientos, tales como la dirección de destino y/o la calidad de servicio del paquete. En seguida, dichos paquetes son almacenados en *buffers* electrónicos (colas) de acuerdo a la clasificación realizada anteriormente. Una vez la ráfaga se haya conformado, esta se envía a un planificador el cual toma la decisión de enviar el BCP y después de un tiempo de *offset* se envía la ráfaga de datos [6], [31].



Expuesto lo anterior, es necesario tener claro algunos aspectos adicionales en cuanto al tamaño de la ráfaga y la relación entre el tiempo de *offset*, el tamaño de las ráfagas y los retardos generados en el ensamble de la ráfaga.

- **Tamaño de las ráfagas:** Este es un parámetro importante en el diseño de las redes OBS/DWDM y puede afectar notablemente el desempeño de las mismas. Se considera que las ráfagas pueden estar compuestas desde unos pocos paquetes IP, hasta un gran número de estos mismos. De aquí, que se pueden tener dos tamaños fijos de ráfagas, un máximo (denotado como  $B_{max}$ ) y uno mínimo (denotado como  $B_{min}$ ). El tamaño máximo de una ráfaga de datos se determina basado en el máximo retardo que pueden tolerar los paquetes IP, mientras que el tamaño mínimo se determina con base en la velocidad del procesamiento electrónico, velocidad de conmutación de un canal de control y el tamaño máximo de un único paquete IP.

Pero establecer el tamaño ideal de la ráfaga es un problema de vital importancia tanto para la red como para los usuarios de la misma. Un tamaño pequeño de la ráfaga, generará un incremento en el número de las mismas en la red, lo que a su vez conduce a una mayor probabilidad en el número de contenciones que se producen, pero el promedio del número de paquetes perdidos por contención es bajo. Por otro lado, un tamaño grande de la ráfaga reducirá el número de ráfagas en la red, por tanto, la probabilidad de que se produzca una contención será mucho menor con respecto al caso anterior, pero a diferencia de que la pérdida de paquetes por contención será elevada [6] [32] [7].

- **Relación entre el tiempo de *offset*, el tamaño de las ráfagas y los retardos generados en el ensamble de la ráfaga:** para observar más en detalle este aspecto, en analiza la *Figura 2. 8*.

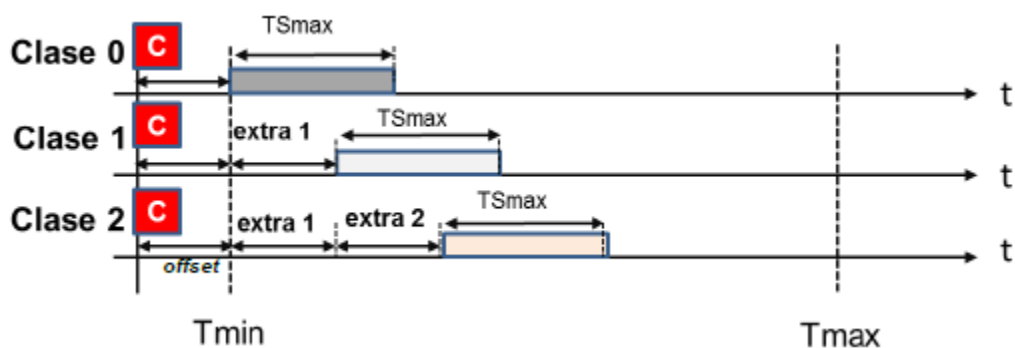


Figura 2. 8 Interrelación entre el tiempo de Offset y el tamaño de ráfaga. Tomado de [7].



En la *Figura 2. 8* se observa la relación que existe entre los tiempos de offset que hay para cada tipo de tráfico (clase 0, clase 1 y clase 2) y el tamaño de cada ráfaga. Los valores extra 1, extra 2 corresponden al tiempo extra de offset para el tráfico clase 1 o clase 2.  $T_{min}$ , es el tiempo de offset base,  $T_{max}$  es el retardo máximo tolerado de un paquete IP,  $TS_{max}$ , es el tiempo de transmisión de una ráfaga de datos de tamaño máximo y  $C$  corresponde al encabezamiento BCP. Para brindar una probabilidad baja de bloqueo y contención en las ráfagas de datos de clase alta (clase 2), se asigna más tiempo de offset respecto a las ráfagas de clase 1 y por tanto, el tamaño máximo de la ráfaga dependerá del máximo retardo tolerado por un paquete IP. Si existen  $n$  diferentes clases de servicio y estas no están relacionadas entre sí, entonces, el retardo máximo experimentado por el tráfico de clase alta, se muestra en la siguiente expresión.

$$\text{Retardo máximo} = T_{min} + TS_{max} * n + \text{Retardo de Propagación.} \quad (2.2)$$

Existen diversos mecanismos para el control del ensamble de ráfagas. Estos se agrupan de la siguiente manera:

- **Métodos básicos:** Son los más sencillos de implementar, con las desventaja de no brindar las mejores prestaciones. Por lo general, para la conformación de las ráfagas, los tiempos y umbrales de longitud son fijos.
- **Métodos adaptativos:** Estos métodos varían de acuerdo a la cantidad de tráfico que esté cursando la red. Pueden adaptar los valores de tiempo y umbral de longitud, por lo que es necesario que exista una manera de censar el tráfico que entra a la red y por medio de esto, adaptar los valores de tiempo y longitud para el funcionamiento adecuado de dicho tráfico.
- **Métodos predictivos:** Existen diferentes alternativas para la implementación de este método, donde, por lo general, se brindan mejores comportamientos como la reducción del retardo producido por el ensamblado pero con un grado de complejidad alto.

#### 2.2.1.1.2 Algoritmos de Ensamble de Ráfagas

Los algoritmos de ensamble de ráfagas pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- Algoritmos basados en tiempo, (*timer based*).
- Algoritmos basados en longitud de ráfaga, (*threshold based*).
- Algoritmo mixto o híbrido, (*mixed timer/threshold-based*).



### 2.2.1.1.2.1 Algoritmo basado en tiempo $T$

En este esquema de ensamble de ráfagas basado en tiempo, una ráfaga es creada y enviada a la red en intervalos periódicos de tiempo. De aquí, que la longitud de la ráfaga puede variar de acuerdo a la carga de tráfico [6].

El valor del *timeout* o  $T$  para este esquema, debe ser seleccionado cuidadosamente, ya que son varios los aspectos que se ven afectados por este valor. Si el tiempo escogido es muy grande, el retardo que experimenta un paquete en el nodo frontera puede ser intolerable. De otro modo, si el tiempo escogido es muy pequeño, se puede generar muchas ráfagas y paquetes de control en la red. En conclusión, el valor que se le asigne a  $T$  limita el retardo que los paquetes que están en cola de ensamble pueden experimentar con un valor máximo, cuando la carga de tráfico de la red es baja, de igual manera, el valor que se le asigna a la longitud de la ráfaga, permite reducir el retardo que puede experimentar esta cuando la carga de tráfico es alta [33], [7].

### 2.2.1.1.2.2 Algoritmo basado en longitud de la ráfaga

En este esquema, se utiliza un umbral el cual especifica el número de paquetes a ser agregados en la ráfaga con una longitud máxima de la misma (denominado  $B_{max}$ ). Esta se forma en el momento en que llega un paquete que hace que la longitud total de todos los paquetes almacenados supere el umbral establecido. Una vez formada la ráfaga, esta se envía a la red. De igual manera, con frecuencia se hace uso de un valor mínimo de ráfaga o  $B_{min}$ , que evita ensamblar ráfagas con tamaños muy reducidos, lo cual conlleva a una mala utilización del ancho de banda, entre otros inconvenientes [6], [7], [32].

Estos dos métodos, al considerar solo un criterio de ensamble (tiempo o umbral de longitud de ráfaga), presentan inconvenientes cuando hay un cambio considerable en el tráfico de la red. En la *Figura 2. 9* se observa el impacto del valor umbral para el tamaño de la ráfaga y del valor del umbral de tiempo  $T$  dependiendo de la carga de tráfico que se tenga.



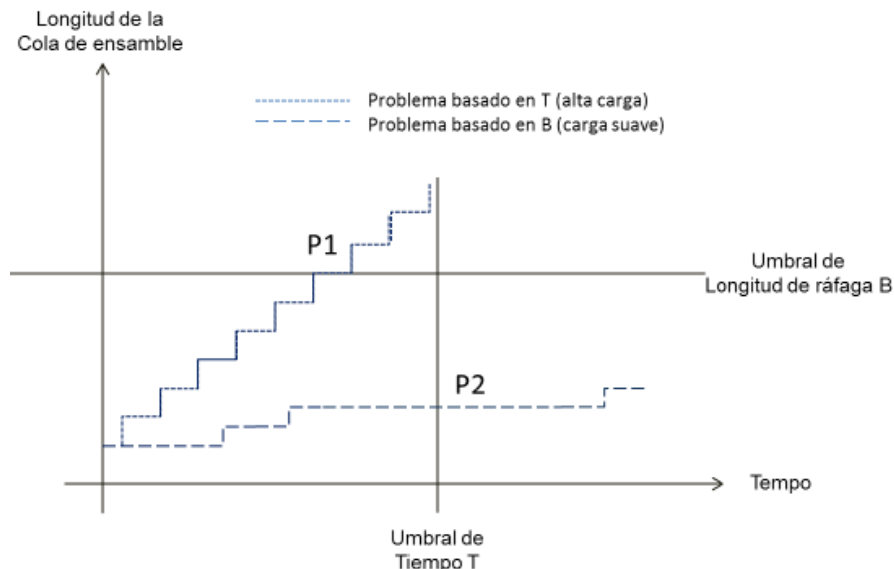


Figura 2. 9 Algoritmos de ensamble por tiempo y longitud de ráfaga. Tomada de [7].

Expuesto lo anterior, el algoritmo de ensamble basado en longitud de la ráfaga no puede garantizar un límite al máximo retardo tolerado en la cola de ensamble. Por su parte, el algoritmo basado en tiempo no cuenta con este problema ya que puede enviar la ráfaga después de un tiempo  $T$ , independientemente del número de paquetes que haya en la ráfaga, como se muestra en la Figura 2. 9 en el punto P2. A su vez, este mecanismo basado en tiempo, en condiciones de alto tráfico puede hacer aumentar el retardo experimentado por un paquete, por lo que para este caso, el mecanismo de ensamble basado en longitud de ráfaga, puede enviar la ráfaga en el punto P1.

Estos algoritmos de ensamble son los más comunes y de los cuales se toma base para la realización de nuevos algoritmos. En el presente trabajo de grado se tienen en cuenta para la obtención del modelo de ensamble de ráfagas integrando una metaheurística híbrida.

### 2.2.1.1.2.3 Algoritmo mixto o híbrido

Este algoritmo, como su nombre lo indica, es una combinación de los dos vistos anteriormente, donde lo que se propone es tomar las ventajas de cada algoritmo y unirlos en uno solo. Para esto, una ráfaga será enviada una vez que se cumpla el tiempo establecido o cuando se alcance la longitud fijada (lo que ocurra primero).

La ráfaga es enviada a la red si esta alcanza su tamaño máximo  $B_{max}$ , o si el tamaño de la ráfaga es menor que  $B_{min}$  y el tiempo  $T$  se ha cumplido. En caso de que no se



haya completado el tamaño mínimo de la ráfaga en el tiempo establecido, una de las opciones contempladas es rellenar la ráfaga hasta completar su tamaño mínimo. [7]

### **2.2.1.2 Nodo Central**

Los nodos centrales o también denominados nodos core en una red OBS/DWDM, son los encargados de realizar los procesos de detección y conmutación de cada una de las ráfagas mediante la configuración de una matriz de conmutación, así como la actualización de los paquetes de control de ráfagas, los cuales como ya se explicó con anterioridad para que puedan ser procesados por la SCU necesitan de una previa conversión del dominio óptico al eléctrico para que cada una de estas BCP. Estos nodos centrales están la capacidad de ejecutar cambios de longitud de onda de cada uno de los canales de transmisión [34].

### **2.2.1.3 Protocolos de Reserva de Recursos**

Una ráfaga al ser enviada por una red óptica, requiere de protocolos de reserva de recursos o esquemas de señalización con el fin de asignar los recursos necesarios y configurar los enrutadores ópticos en cada nodo. Estos esquemas en las redes OBS/DWDM, son implementados utilizando paquetes de cabecera fuera de banda y en una longitud de onda diferente a la que será enviada la misma ráfaga de información. Estos protocolos utilizan un tiempo de offset entre la transmisión de BCP y una ráfaga, este requiere de mecanismos para estimar dicho valor a fin de estimar el adecuado y no generar ninguna pérdida de datos. Los esquemas a resaltar dado que son los más utilizados son: el esquema de Contar y Seguir (TAG, *Tell And Go*), el esquema de decir y esperar (TAW, *Tell And Wait*), el esquema de Solo el Tiempo Justo (JET, *Just Enough Time*), el cual es el utilizado en este trabajo de grado y el esquema de Tiempo Justo (JIT, *Just In Time*) [4].

#### **2.2.1.4.1 Mecanismo JET**

Este protocolo es el más utilizado en las redes OBS/DWDM. Está basado en el esquema TAG y su característica principal es el uso de un nuevo concepto llamado Reserva Atrasada (DR, *Delayed Reservation*) que consiste en la reservación de recursos en el momento de llegada de la ráfaga al nodo central y de esta manera, evita el desperdicio de tiempo de procesamiento del BCP [19] [5].

El funcionamiento de este esquema de señalización se describe a continuación, y de igual manera se puede observar en la *Figura 2. 10* [35]:





1. En el nodo de borde, teniendo una ráfaga para transmitir con su respectivo paquete de control, envía primero dicho paquete BCP sobre el canal de señalización el cual tiene una longitud de onda dedicada hacia el nodo destino.
2. El paquete de control es procesado en cada nodo intermedio a fin de reservar los recursos necesarios de la red, obtener el tiempo de llegada de la ráfaga de datos a cada nodo y establecer un camino de datos totalmente óptico.
3. Si la reservación es exitosa, el nodo en cuestión será configurado antes de la llegada de la ráfaga y el tiempo de offset debe ser disminuido y actualizado para el correcto procesamiento del siguiente nodo.
4. Si la reservación no es exitosa dado que no hay recursos disponibles en un nodo determinado, la ráfaga será descartada y no se prosigue con el proceso de reservación de recursos en los nodos siguientes.
5. Después de que la ráfaga ha dejado el nodo, este libera los recursos que se habían reservado inicialmente para programar el arribo de nuevas ráfagas al nodo.

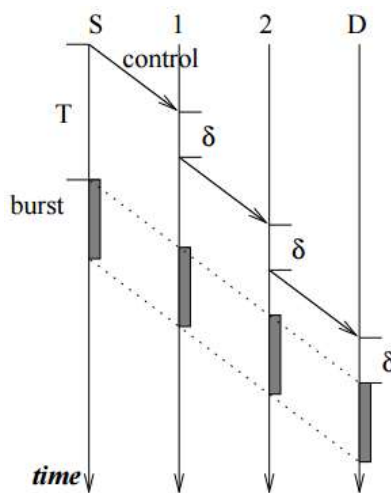


Figura 2. 10 Esquema funcional del protocolo JET. Tomado de [5].

#### 2.2.1.4.2 Mecanismo JIT

Este protocolo es una variación del esquema TAW, donde el BCP se envía inicialmente por la ruta que recorrerá la ráfaga para obtener la información de disponibilidad de canales en cada nodo. La solicitud de transmisión de una ráfaga se envía a un planificador central, donde este informa a cada nodo que desea transmitir, el tiempo exacto para enviar la ráfaga de datos.



JIT hace referencia a que en el momento en que una ráfaga llega a un nodo intermedio, la conmutación para esta ya ha sido configurada. El funcionamiento de este esquema es el siguiente: primero se envía el BCP, al llegar al último nodo, este transmite un Paquete de Confirmación de Reserva (ACK, *Acknowledgement*) en caso de que se dispongan de todos los recursos y finalmente la ráfaga se transmite cuando el paquete de confirmación llegue al nodo origen. En caso de que no se tengan disponibles los recursos necesarios en cada nodo, se envía un paquete de rechazo de conexión y la ráfaga no se transmite [6] [35].

#### **2.2.1.4. Algoritmos de planificación**

Después que la ráfaga se ha enviado a la red, esta debe pasar por diferentes nodos hasta llegar a su destino final. Cuando la ráfaga llega a un nodo, se le debe asignar una longitud de onda en un tiempo determinado para que continúe su camino hasta su nodo de egreso. Este proceso se debe realizar tanto en los nodos de borde como en los nodos centrales. En esta planificación, se considera que los nodos en OBS/DWDM soportan conversión de longitud de onda; de esta manera, una ráfaga con una longitud de onda en la interfaz de entrada, puede salir por una longitud de onda distinta en la interfaz de salida.

A diferencia de la planificación que se existe de paquetes IP, donde los enrutadores tienen memorias que permiten almacenar los paquetes, reduciendo la probabilidad de bloqueo, la planificación de los canales en redes OBS/DWDM se debe realizar de manera distinta dado que al no existir buffers ópticos, la ráfaga debe ser enviada directamente al siguiente nodo sin un almacenamiento temporal. [6]

Cada nodo analiza la información que contiene el BCP y determina tanto la duración de la ráfaga como el tiempo de llegada de la misma. Con esta información, el nodo determina si dispone de los recursos necesarios para la conmutación de la ráfaga que viene en camino. De ser así, 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 [28].

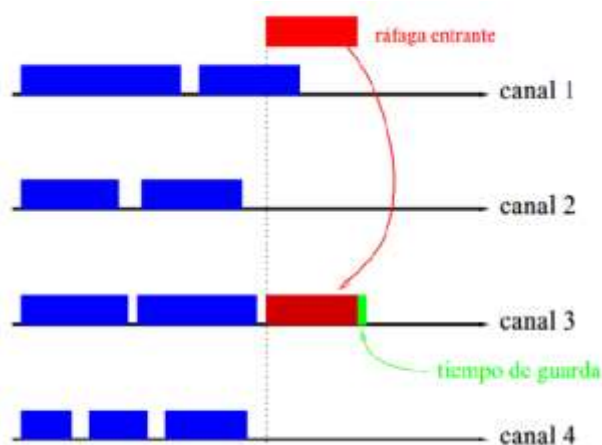
Existen diferentes algoritmos de planificación de ráfagas los cuales difieren en la manera como aprovechan las líneas de tiempo de las diferentes longitudes de onda en las interfaces de salida. A continuación se describe la técnica de planificación más utilizada en OBS/DWDM.



#### 2.2.1.4.1 Horizonte de planificación

Se define como el último instante en que el canal está programado para estar en uso. El Último Canal Disponible sin Planificación (LAUC, *Lastest Available Unscheduled Channel*) – *Horizon*, es un algoritmo simple de planificación, donde cada canal de datos tiene un registro del LAUC y de esta manera selecciona el canal de salida que contenga el horizonte de planificación más próximo al instante de llegada de la ráfaga [16] [23] [25].

En *Figura 2. 11* se tiene un ejemplo de la planificación de una ráfaga, con 4 longitudes de onda en la interfaz de salida, cada una con una cantidad de ráfagas previamente planificadas.



*Figura 2. 11* Funcionamiento del algoritmo horizonte de planificación. Tomada de [25].

En la *Figura 2. 11*, se observa que la ráfaga entrante no puede ser planificada por el canal 1 debido a que este supera el horizonte de planificación con la misma ráfaga. Por tanto, dicha ráfaga solo puede ser planificada por los canales 2, 3 y 4 cada uno con su longitud de onda respectiva. Al tener los canales 2 y 4 el horizonte de planificación más lejano con respecto a la llegada de la ráfaga, la mejor opción para la planificación es el canal 2, el cual deja un hueco menor en el planificador. Este algoritmo debe almacenar el instante final que está planificado en cada longitud de onda, para la próxima planificación, considerando el tiempo de guarda<sup>21</sup>.

<sup>21</sup> Intervalo definido para permitir la configuración de la matriz de conmutación



### **2.2.1.5 Mecanismos de resolución de contienda**

Las redes de conmutación óptica por ráfagas son redes que no están orientadas a conexión, lo que quiere decir que la transmisión de las ráfagas se inicia sin que haya confirmación de la reserva de recursos en los nodos intermedios de la red. Por tal motivo, cabe la posibilidad de que unas ráfagas colisionen con otras en estos nodos intermedios. Las contiendas se producen cuando diferentes ráfagas de diferentes puertos de entrada tienen el mismo destino o puerto de salida al mismo tiempo, con la misma longitud de onda.

En redes electrónicas, como por ejemplo en redes de conmutación de paquetes, este inconveniente se soluciona almacenando los paquetes en buffers hasta la liberación del puerto de salida, pero en el dominio óptico es más complejo el uso de memorias ya que en la actualidad no existen memorias de almacenamiento en el dominio óptico [25], [33].

En las redes OBS/DWDM, algunos de los mecanismos de resolución de contienda son: estructuras de líneas de retardo (FDL, *Fiber Delay Lines*), segmentación de la ráfaga, desviación por enrutamiento, conversión de longitud de onda [6],[21], entre otros. A continuación se describe brevemente los mecanismos de contención utilizados en este trabajo de grado.

#### **2.2.1.5.1. Eliminación (dropping)**

Si un paquete de control no puede reservar los recursos solicitados a la red y no se dispone de un mecanismo de resolución de contienda, la ráfaga asociada es descartada [36].

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

En enlaces de fibra óptica, entre dos nodos existen múltiples longitudes de onda que pueden ser utilizadas para dar solución al problema de contenciones si se hace uso de la multiplexación por división de longitud de onda. De aquí, que si dos ráfagas entran en contención por querer salir por el mismo puerto de salida en el mismo instante de tiempo, cada una puede utilizar una longitud de onda diferente. Este mecanismo consiste en la conversión de cualquier longitud de entrada a otra diferente a la salida. Para esto, se requiere de conversores de longitud de onda en los nodos lo que incrementa la reutilización de las longitudes de onda y por tanto la reducción considerable de la pérdida de paquetes en una red OBS/DWDM [36][33].



### 2.2.1.6. Red EON

La red EON fue una iniciativa de la comisión europea, con el ánimo de promover la competitividad entre la industria, universidades y centros de investigación. Esta red fue diseñada para transportar todo el tráfico de datos que circula a través de los principales servidores de Europa, los cuales en un principio se identificaron 20 nodos que funcionaban como puertas de enlace de todo el tráfico que circula por este continente europeo [37]. Esta red consta de 11 nodos con 26 enlaces bidireccionales cada uno de estos está conformado por 16 longitudes de onda con 10Gb/s de capacidad, con un esquema de señalización JET y con distancia entre ciudades de 210km a 1310km, cada nodo soporta el tráfico de entrada y salida de la red y se compone de un enrutador de núcleo y uno de borde. En la *Figura 2. 12* la red tiene una topología irregular y cada uno de sus 11 nodos constituye una ciudad Europea.

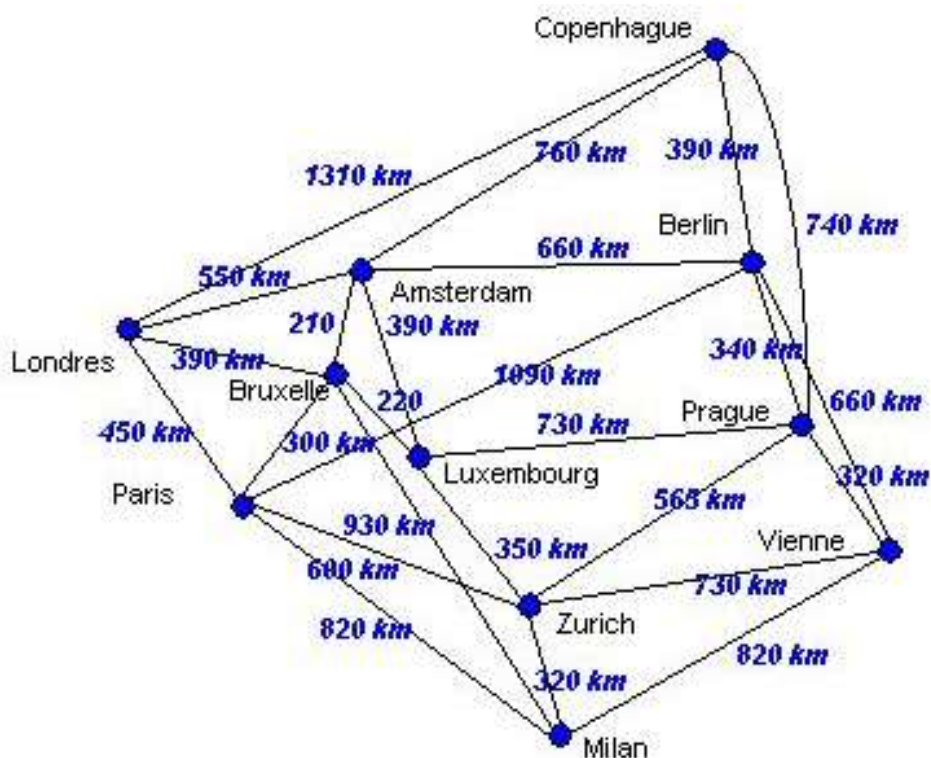


Figura 2. 12 Red COST239. Tomada de [38].

A pesar de todo esto, se identificaron una serie de problemas para su implementación real, los cuales en la actualidad son tema de investigación en muchas universidades a nivel mundial, entre los cuales se destacan: la gran cobertura geográfica, necesidad de altas tasas de transferencia con tan solo 11



nodos disponibles para su implementación y la relación costo beneficio en el momento de la implementación, debido, a la necesidad de utilizar dispositivos de alta tecnología en las redes OBS/DWDM. Además a esto en la actualidad es materia de investigación el modelo de tráfico, capacidad de los enlaces, topología escalable, limitación de longitudes de onda, probabilidad de bloqueo, entre otros aspectos, que se deben tener en cuenta para la implementación de este tipo de redes, debido a que como ya se había mencionado anteriormente en la actualidad los usuarios están creciendo con un comportamiento exponencial las demandas de recursos de la red, llegando incluso a los terabit por segundo, por consiguiente a largo plazo las redes actualmente implementadas no van a dar abasto.

### 2.3 Método cognitivo

Con la necesidad que se tiene en la actualidad de soportar el aumento exponencial que ha tenido el tráfico de internet, a corto o mediano plazo se hace necesario utilizar diferentes tecnologías de conmutación óptica, a las cuales se les integra un método cognitivo para que tenga la capacidad de soportar los servicios de nueva generación [39]. El término “cognición” aplicado a las redes de comunicación fue implementado por Josep Mitola [40], inventor del Radio Cognitivo (CR, *Cognitive Radio*), en donde define el radio cognitivo como “*un sistema en donde el radio automáticamente observa su entorno, infiere su concepto, evalúa posibilidades, crea planes, supervisa los servicios y aprende de sus errores*”. El CR definido por Josep Mitola, consta de seis pasos fundamentales: (1) observar cómo la radio interactúa con su entorno, (2) Aprendizaje de la interacción con el entorno, (3) Establecimiento de las prioridades, (4) Planear donde se generan las alternativas, (5) Decidir donde se ubican los recursos y tomar acción sobre la configuración del sistema. En la *Figura 2. 13* se muestra el ciclo de radio cognición definido por Josep Mitola.



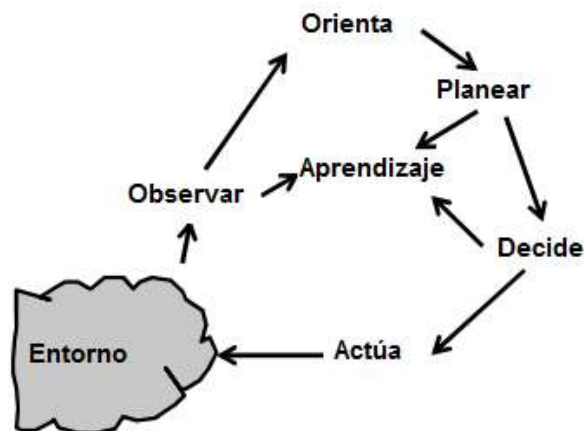


Figura 2. 13 Ciclo de radio cognición. Modificado de [41].

Por su parte, las Redes Cognitivas (CN, *Cognitive Network*) se definen como redes que utilizan los procesos cognitivos para percibir las condiciones de su estado actual y su entorno, son capaces de tomar decisiones basadas en el aprendizaje continuo que le permite adaptarse a cambios en su entorno y modificar su comportamiento de acuerdo a los requerimientos de usuarios o condiciones actuales de la red [42], [43]. Una red cognitiva difiere de otras tecnologías de comunicación inteligente en que tiene objetivo extremo a extremo en relación al flujo de datos y en que está diseñada para ir más allá de la auto modificación [44], motivado por el Plano de Conocimiento (KP, *Knowledge Plane*) [45], en donde busca que las redes tengan un mecanismo automático de reparación ante fallas.

### 2.3.1 Arquitectura en redes ópticas cognitivas

Como se mencionó anteriormente, las redes ópticas cognitivas están ejecutando constantemente un proceso de aprendizaje de su entorno, es decir, los protocolos, mecanismos, algoritmos y servicios están aprendiendo de la experiencia y adaptándose a las condiciones del entorno para mejorar el funcionamiento esta, para esto se hace necesario que la red recopile información proveniente de alguna(s) de sus capas y aplicar esta información en el proceso de gestión y actualización del estado actual de red. La existencia de estas capas conlleva a la existencia de una arquitectura de las redes ópticas cognitivas, tal y como se muestra en la *Figura 2. 14*, a continuación se realiza una explicación detallada de las capas que conforma la arquitectura de las redes ópticas.

La arquitectura de las redes ópticas cognitivas es la base fundamental de la comunicación usuario-aplicación, proceso que se ejecuta en el momento en el que



el usuario o servicio desea establecer una conexión con la red para el uso de una aplicación determinada. Para acceder a los recursos de la red el usuario o servicio debe hacer una petición de acceso a la Capa de Requerimientos (RL, *Requirement Layer*) en donde se debe interpretar los requerimientos de los usuarios o servicios, expresarlos de una manera lógica con ayuda del conocimiento adquirido de su entorno a través de la experiencia.

En la Capa de Aplicación (AP, *Application Layer*) se realizan los procesos de codificación y decodificación, para comprimir y gestionar aplicaciones multimedia caracterizadas por su gran tamaño. Cada una de estas aplicaciones tienen la propiedad de auto adaptarse, es decir, aumentar o reducir el nivel de compresión al que se ven expuestas, para así poder recibir la información en el destinatario bajo unas condiciones QoS determinadas [46].

El siguiente nivel en la arquitectura de las redes ópticas cognitivas se denomina Plano de Servicio (SP, *Service Plane*), el cual contiene elementos que tienen características de autoconfiguración y auto organización bajo unas condiciones de red y requerimientos de los usuarios. Entre estos elementos se destacan los mecanismos de virtualización, abstracción, composición de servicios, entre otros. El Plano de Control (CP, *Control Plane*) es una capa compuesta por mecanismos de señalización y protocolos de enrutamiento que ejecutan un proceso cognitivo para recibir algoritmos auto configurables y así, poder adaptar sus rutinas dependiendo de la infraestructura de la red y el estado actual de las aplicaciones usadas [46].

La capa de Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*), tiene la facultad de reconfigurar protocolos, algoritmos, canales cognitivos y localización del Ancho de Banda (BW, *Bandwidth*) en uno o múltiples canales de la red, para que de esta manera tengan la autonomía de auto adaptarse cada una de las aplicaciones y así poder ser transportados en el formato adecuado para una óptima recepción de la información.

En el nivel más bajo se encuentra la Capa Física (PL, *Physical Layer*), compuesta por módulos hardware/software con la capacidad de adaptar, configurar y optimizar el funcionamiento de su estructura de manera autónoma. El formato de modulación, tasa de bit, número de longitudes de onda utilizadas, son algunos de los parámetros que se pueden reconfigurar en esta capa.

Por último se encuentra el módulo Cognitivo de Optimización Multicapa (*Cognitive Cross-Layer Optimization*), el cual interactúa con el ciclo cognitivo descrito en la *Figura 2. 13*.



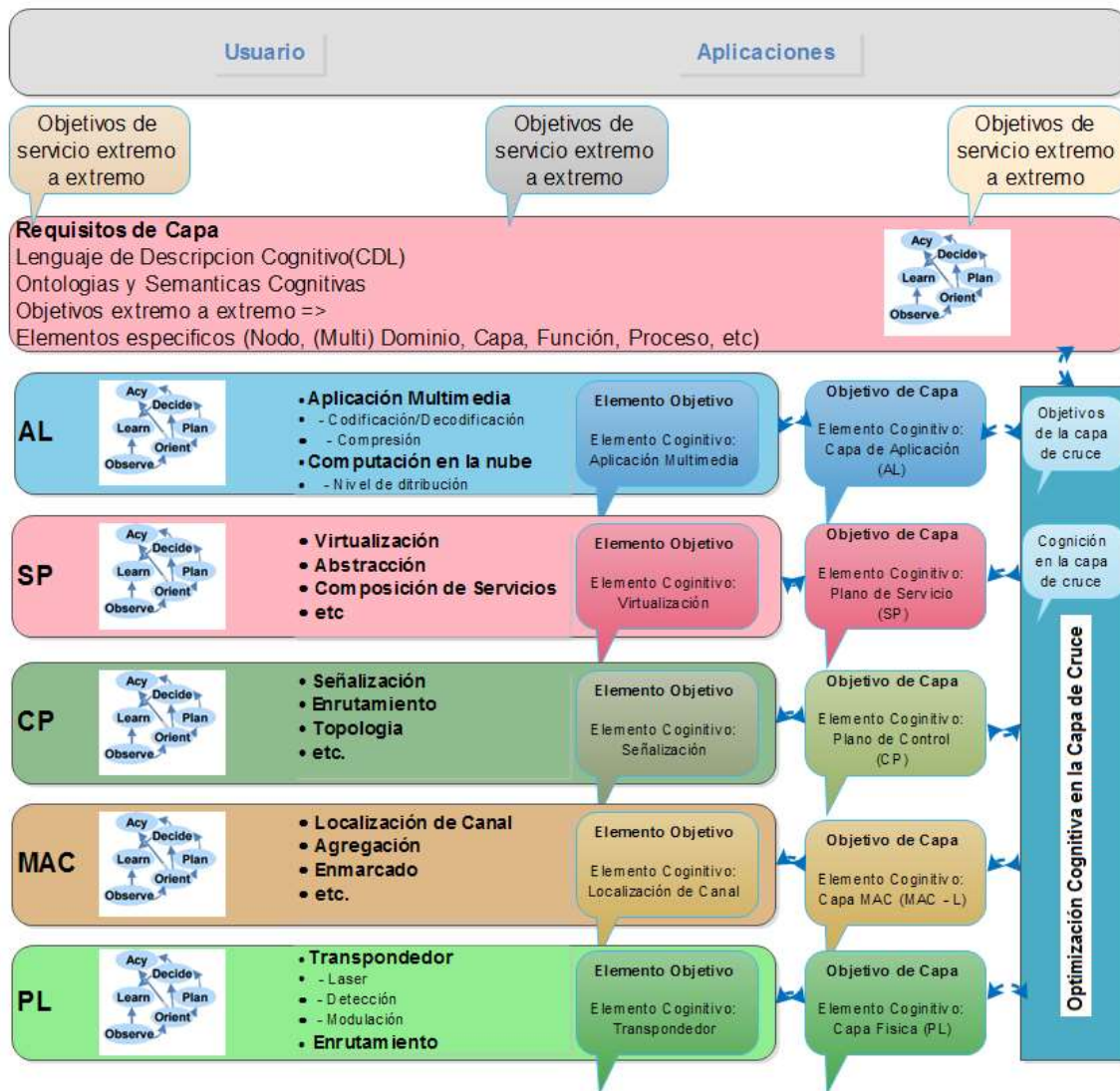


Figura 2. 14 Arquitectura de las redes ópticas cognitivas. Modificado de [46].

## 2.4 Metaheurísticas

Como se mencionó en el capítulo 1, el ensamble de ráfagas, tema de análisis principal del presente trabajo de grado, está catalogado como un problema de Tiempo Polinomial no Determinístico Completo, por lo que encontrar un algoritmo que permita obtener una solución determinística a este problema puede llegar a ser bastante complejo. Por lo anterior, se recurre a las técnicas metaheurísticas que permiten modelar cualquier tipo de problema ofreciendo una convergencia hacia el óptimo global con un grado de complejidad menor a la solución determinística. A



continuación se define el término de metaheurística, sus características y clasificaciones.

Una heurística es un “*procedimiento simple, a menudo basado en el sentido común, que se supone que ofrecerá una buena solución (aunque no necesariamente la más óptima) a problemas difíciles, de un modo fácil y rápido*” [47]. De aquí, que se utilice un heurístico cuando no existe un método exacto de resolución, cuando existe pero consume demasiado tiempo en obtener una solución óptima, entre otras.

El término metaheurística se obtiene al anteponer a heurística el sufijo *meta* que significa “más allá” o “a un nivel superior”. Estas técnicas son estrategias inteligentes para diseñar o mejorar procedimientos heurísticos muy generales con un alto rendimiento, es decir, que a diferencia de estos últimos, las metaheurísticas tratan de obtener óptimos globales en vez de locales orientando la búsqueda en cada momento y dependiendo de la evolución del proceso de búsqueda [11][12].

La combinación de las técnicas de optimización antes descritas, pueden proporcionar un comportamiento más eficiente y una mayor flexibilidad cuando se trabaja con problemas de gran escala. A esta combinación se le conoce como Metaheurísticas Híbridas, las cuales se utilizan para complementar la optimización de procesos combinando diferentes metaheurísticas [13].

#### **2.4.1 Clasificación de las metaheurísticas**

Existen diferentes modos de clasificar y describir las metaheurísticas dependiendo de las características que se seleccionen para diferenciarlas entre sí. Es posible clasificarlas en metaheurísticas inspiradas en la naturaleza y las no inspiradas, basadas en memoria o sin memoria, entre otras. Pero una de las clasificaciones más utilizadas, son las denominadas metaheurísticas basadas en trayectoria y las metaheurísticas basadas en población. En la *Figura 2. 15* se observa la clasificación mencionada y las distintas metaheurísticas dentro de cada clase.

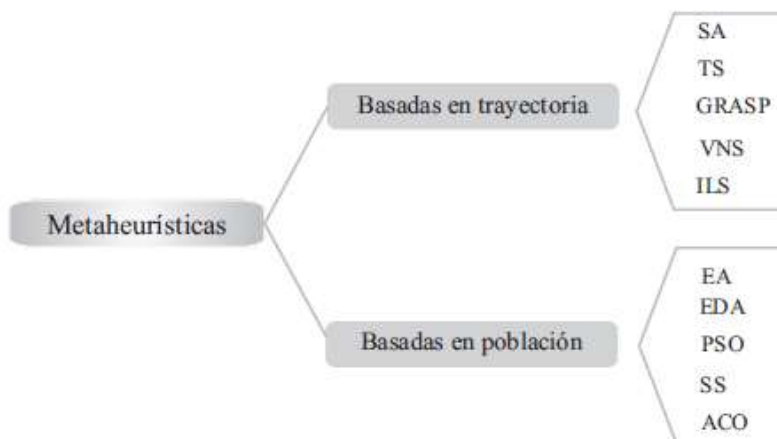


Figura 2. 15 Clasificación de las Metaheurísticas. Tomada de [10].

### 2.4.1.1 Metaheurísticas basadas en Trayectoria

Estas técnicas se caracterizan por partir desde un punto inicial e ir actualizando la solución actual mediante la exploración del vecindario, formando una trayectoria. Este proceso de búsqueda termina al alcanzar un número máximo de repeticiones, se encuentre una solución con una calidad aceptable o hay un estancamiento del proceso [48]. A continuación se describen algunas de las metaheurísticas basadas en trayectoria.

#### 2.4.1.1.1 Enfriamiento Simulado (SA, *Simulated Annealing*)

Esta es una de las técnicas metaheurísticas más antiguas y una de las primeras con una estrategia explícita para no llegar a obtener mínimos locales. El objetivo del SA consiste en simular el proceso de enfriamiento de un metal y del cristal. Para evitar obtener una solución que sea un mínimo local, el algoritmo permite elegir con cierta probabilidad una solución cuyo valor de *fitness* sea peor que el de la solución actual. En cada iteración se elige una solución S1 a partir de una solución S0 del vecindario N(S). Si S1 es mejor que S0, S1 sustituye a S0 como solución actual. Si S1 es peor que S0, se acepta pero con una determinada probabilidad [48], [49].

#### 2.4.1.1.2 Búsqueda Tabú (TS, *tabú Search*)

La búsqueda tabú se basa en la utilización de un historial de búsqueda tanto para escapar de los mínimos locales como para implementar su estrategia de exploración y de esta manera evitar buscar varias veces en la misma región. El historial o memoria, se implementa con una lista tabú, donde se encuentran las soluciones



más recientes. En cada búsqueda se elige la mejor solución y se añade a la lista tabú [49].

#### **2.4.1.1.3 Procedimiento de Búsqueda Miope Aleatorizado y Adaptativo (GRASP, *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*)**

Es una metaheurística simple que combina heurísticos constructivos con búsqueda local. Esta técnica consta de dos fases, primero la construcción de una solución y después un proceso de mejora. Esta mejora se obtiene debido al resultado del proceso de búsqueda [10].

En GRASP para la fase de construcción se requiere una función de evaluación miope, un procedimiento de elección al azar y un proceso de actualización adaptativo. Para poder obtener un algoritmo GRASP eficaz, se debe realizar un examen cuidadoso de sus componentes y de las interacciones entre ellas. Una vez que se han ejecutado las dos fases anteriores, la solución obtenida se guarda y se efectúa una nueva iteración, almacenando la mejor solución encontrada hasta entonces

#### **2.4.1.1.4 Búsqueda con Vecindario Variable (VNS, *Variable Neighborhood Search*)**

Esta técnica consiste en cambiar de forma sistemática la estructura de entorno durante la búsqueda. Este algoritmo es muy genérico, con muchos grados de libertad y permite variaciones y modificaciones particulares [10].

#### **2.4.1.1.5 Búsqueda Local Iterada (ILS, *Iterated Local Search*)**

Es una técnica robusta, simple de implementar y altamente eficiente. Se basa en que en cada iteración a la solución actual se le aplica un cambio o modificación que da lugar a una solución intermedia. A esta solución, se le aplica una heurística que suele ser un método de búsqueda local para poder mejorarla. Este óptimo local puede ser aceptado como nueva solución actual si pasa por un test de aceptación [48].

#### **2.4.1.2 Metaheurísticas basadas en Población**

Estas técnicas trabajan con un conjunto de soluciones denominadas población en cada iteración, a diferencia de los métodos basados en trayectoria, donde se manipula una única solución del espacio de búsqueda por iteración. Su eficiencia y



resultado dependen fundamentalmente de la forma como se manipula la población en cada iteración [46] [47]. A continuación se describen algunas de las metaheurísticas basadas en población.

#### **2.4.1.2.1 Algoritmos Evolutivos (EA, *Evolutionary Algorithms*)**

Estos algoritmos están inspirados en la capacidad natural de evolucionar de los seres vivos bien adaptados a su ambiente. Estas técnicas siguen un proceso iterativo y estocástico que operan sobre una población de soluciones, las cuales se denominan en el contexto, individuos. Inicialmente la población es generada de forma aleatoria. El funcionamiento básico de estos algoritmos consta de tres partes: selección, reproducción y reemplazo. Este proceso se realiza hasta que se cumpla un criterio de terminación. En la primera fase, se seleccionan los individuos más aptos de la población actual para realizar el proceso de recombinación en la fase de reproducción. Los individuos resultantes de esta segunda fase se alteran mediante un operador de mutación. Por último, a partir de la población actual y los mejores individuos generados, se integra la nueva población, dando paso a la siguiente generación del algoritmo [47] [48].

Los algoritmos evolutivos pueden ser clasificados en tres categorías: programación evolutiva, estrategias evolutivas y los algoritmos genéticos.

#### **2.4.1.2.2 Algoritmos de Estimación de la Distribución (EDA, *Estimation of Distribution Algorithms*)**

Estos algoritmos tienen gran similitud con los algoritmos evolutivos presentados anteriormente, los EDA trabajan sobre una población de posibles soluciones al igual que los algoritmos evolutivos, pero a diferencia de estos últimos, que utilizan recombinación y mutación, los EDA infieren la distribución de probabilidad del conjunto seleccionado y, con esta, generan nuevas soluciones que serán parte de la nueva población [49].

#### **2.4.1.2.3 Optimización basada en Enjambre de Partículas (PSO, *Particle Swarm Optimization*)**

Esta técnica está basada en el comportamiento social del vuelo de las bandadas de aves o el movimiento de los bancos de peces. Este algoritmo tiene un conjunto de soluciones inicializadas aleatoriamente en el espacio de búsqueda denominadas partículas que busca el óptimo al actualizar las distintas generaciones que se tengan. Cada una de las partículas posee una posición y una velocidad que van





cambiando constantemente conforme avanza la búsqueda. PSO tiene dos operadores principales: actualización de velocidad y actualización de posiciones. En cada iteración, cada una de las partículas es impulsada hacia la partícula mejor posicionada en la iteración anterior y hacia la mejor posicionada global. En cada iteración se genera un nuevo valor de velocidad para cada partícula de acuerdo a su velocidad actual, la distancia entre la posición actual y la mejor conocida por esa partícula y la distancia entre la posición actual y la mejor conocida por el vecindario. Creada por James Kennedy y Russ C. Eberhart. En 1995, desarrollaron el algoritmo originario experimentando con algoritmos que modelaban el comportamiento del vuelo de algunos pájaros o en el movimiento de los bancos de peces. El algoritmo se basa en la metáfora social: los individuos que son parte de una sociedad tienen una opinión influenciada por la creencia global compartida por todos los posibles individuos. Cada individuo puede modificar su opinión (o estado) según tres factores: el conocimiento del entorno, los estados por los que ha pasado y los estados por los que han pasado los individuos cercanos. Este proceso se realiza una cantidad de veces determinada o hasta que se logre un error mínimo [10] [51].

#### **2.4.1.2.4 Búsqueda Dispersa (SS, *Scatter Search*)**

Este algoritmo se basa en tener un conjunto pequeño de soluciones de calidad y algunos diversos denominados conjuntos de referencia. Se tienen 5 componentes característicos de este método: creación de la población inicial, generación del conjunto de referencia, generación de subconjuntos de soluciones, método de combinación de soluciones y método de mejora. Estos pasos se repiten hasta que se alcanza algún criterio de terminación del proceso [49].

#### **2.4.1.2.5 Optimización basada en Colonia de Hormigas (ACO, *Ant Colony Optimization*)**

Esta técnica está inspirada en el comportamiento de las colonias de hormigas para buscar fuentes de alimentación. El procedimiento que se lleva a cabo es el siguiente: inicialmente, las hormigas exploran el área cercana a su nido de manera aleatoria. Tan pronto una hormiga encuentra comida, la lleva a su nido dejando al mismo tiempo una sustancia química en el camino llamada feromona, la cual ayudará al resto de hormigas a encontrar la comida. Esta feromona, de igual manera ayuda a las hormigas a encontrar el camino más corto entre el nido y la comida. Este comportamiento es el que intenta simular este método para resolver problemas de optimización.



Existe otro tipo de metaheurísticas que se centran en el uso de algún tipo de recurso computacional o forma de uso especial como la programación por restricciones y las redes neuronales, donde esta última se explicará a continuación.

#### **2.4.1.2.6 Redes Neuronales Artificiales (ANN, *Artificial Neural Networks*)**

Este tipo de metaheurística, busca imitar la estructura Hardware (neuronal) de los organismos vivos para tratar de reproducir algunas de sus capacidades. Esto debido a que el cerebro resulta ser un complejo sistema de procesamiento, no lineal, masivamente paralelo y adaptativo, además de ser muy eficiente desde el punto de vista energético en comparación a los computadores actuales [52].

Una red neuronal se compone de unidades denominadas neuronas. Estas son dispositivos simples de cálculo que, a partir de un vector de entrada procedente del exterior o de otras neuronas, proporciona una única salida. Los elementos que constituyen una neurona, como se observa en la *Figura 2. 16* son los siguientes:

- Conjunto de entradas,  $x_j(t)$ .
- Pesos sinápticos de la neurona  $i$ ,  $w_{ij}$  que representan la intensidad de interacción entre cada neurona presináptica  $j$  y la neurona postsináptica  $i$ .
- Función de propagación  $\sigma(w_{ij}, x_j(t))$ , que consiste en la sumatoria de cada entrada multiplicada por su peso de interconexión  $h_i(t) = \sigma(w_{ij}, x_j(t))$ .
- Función de activación  $f_i(a_i(t-1), h_i(t))$ , que brinda el estado de activación actual de la neurona, en función de su estado anterior  $a_i(t-1)$  y de su potencial postsináptico actual.
- Función de salida  $F_i(a_i(t))$ , que brinda la salida actual  $y_i(t) = F_i(a_i(t))$  de la neurona en función de su estado de activación.

De este modo, la operación de la neurona puede expresarse mediante la ecuación 2.3 como se muestra a continuación:

$$y_i(t) = F_i(f_i[a_i(t-1), \sigma_i(w_{ij}, x_j(t))]) \quad (2.3)$$

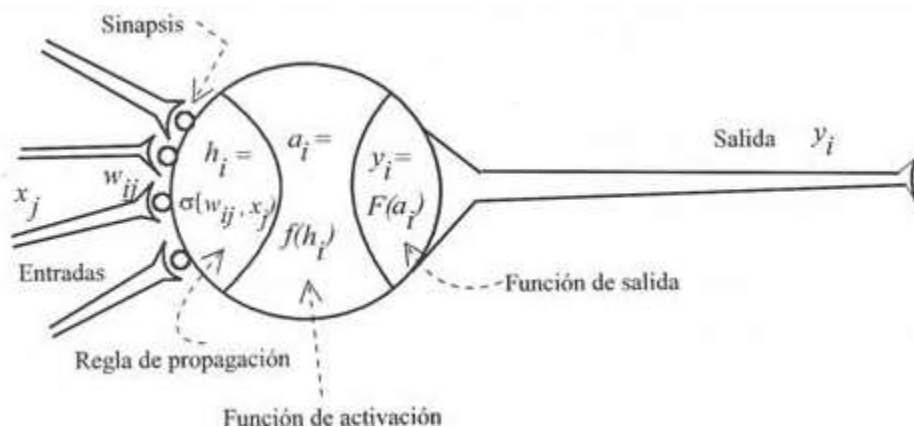


Figura 2. 16 Modelo genérico de neurona artificial. Tomada de [52].

Dado lo anterior, el objetivo de una red neuronal es buscar la combinación de ciertos parámetros de entrada que mejor se ajusten a un determinado problema. Este tipo de redes basan su modalidad de operación en el recuerdo o ejecución y en el modo aprendizaje o entrenamiento. La modalidad de entrenamiento es de particular interés debido a que este tipo de redes trata sobre sistemas entrenables, capaces de ejecutar el procesamiento o computo de información, aprendiendo de un conjunto de patrones de aprendizaje o ejemplos [53].

Un aspecto fundamental de las Redes Neuronales es su capacidad de generalizar a partir de ejemplos, lo que constituye el problema de la memorización frente a generalización. La generalización es la capacidad de la red de dar una respuesta correcta ante ejemplos que no hayan sido utilizados en su entrenamiento. Una red neuronal entrenada correctamente generalizará, esto significa que el mapeo ha sido aprendido adecuadamente no solo los ejemplos concretos presentados, por lo que responderá correctamente ante patrones nunca antes vistos

En un proceso de entrenamiento se debe considerar un error de generalización que puede medirse empleando un conjunto representativo de patrones diferentes a los utilizados en el entrenamiento. De esta manera se puede entrenar una Red Neuronal haciendo uso de un conjunto de aprendizaje y comprobar su error de generalización mediante un conjunto de Test.

Es de vital importancia determinar el número de patrones con los cuales se entrenará la red y el número de neuronas de esta. Esto debido a que se puede dar el caso que la red se ajusta demasiado a las particularidades de los patrones empleados en el entrenamiento, aprendiendo literalmente todos los patrones introducidos a la red, por lo que el error que comete ante patrones diferentes a los empleados en el entrenamiento crece, a esto se le denomina sobre aprendizaje





arrojando un coeficiente de correlación de  $R = 1$ , por lo que la red debe entrenarse hasta un punto óptimo. Este procedimiento consiste en entrenar y validar a la vez para detenerse en el punto óptimo, a esto se le denomina Validación Cruzada.

Las técnicas metaheurísticas expuestas anteriormente serán evaluadas en la sección 3.2 seguido de la selección de las más apropiadas a implementar para el ensamble de ráfagas de la red OBS/DWDM del presente trabajo de grado.



Análisis de desempeño de una red OBS/DWDM distribuida mediante la integración de un método cognitivo basado en metaheurística híbrida para el ensamble de ráfagas  
Juan Camilo Bravo Flórez – Juan David Prado López

---



### **CAPITULO 3: IMPLEMENTACIÓN DE LOS MÓDULOS DE LA RED**

En el desarrollo del presente trabajo de grado se identificaron tres tecnologías de conmutación óptica (por ejemplo, OCS, OPS, OBS/DWDM), las cuales se encuentran en estudio y desarrollo para garantizar las altas demandas de ancho de banda. Los desarrolladores de herramientas de simulación<sup>22</sup> han lanzado al mercado tanto académico como comercial un gran número de programas que permiten el modelamiento de cada una de estas tecnologías en su etapa de prueba. La implementación de cada uno de estos programas, ha brindado herramientas a los investigadores para entender un poco más el funcionamiento de cada una de estas tecnologías y así poder diseñar teoremas y algoritmos que mejoren el rendimiento, seguridad y robustez de estas.

La etapa de prueba o simulación de cada uno de los algoritmos desarrollados, comienza con la formulación de un problema bajo el análisis del comportamiento del sistema; al mismo tiempo, se debe hacer una recolección de datos de los parámetros de entrada que va a tener el software. El modelo conceptual del problema suele estar en muchos casos incompleto o erróneo, debido a esto se debe ejecutar una validación del modelo antes de su implementación. Posterior a este procedimiento, se debe implementar el modelo y verificar su funcionamiento para la definición de los casos de estudio y analizar los resultados de la simulación. En la *Figura 3. 1* se aprecian los siete pasos que se deben seguir para ejecutar un proceso de simulación satisfactorio. [54]

---

<sup>22</sup> Es la imitación del funcionamiento de un proceso en la vida real sobre un programa computacional

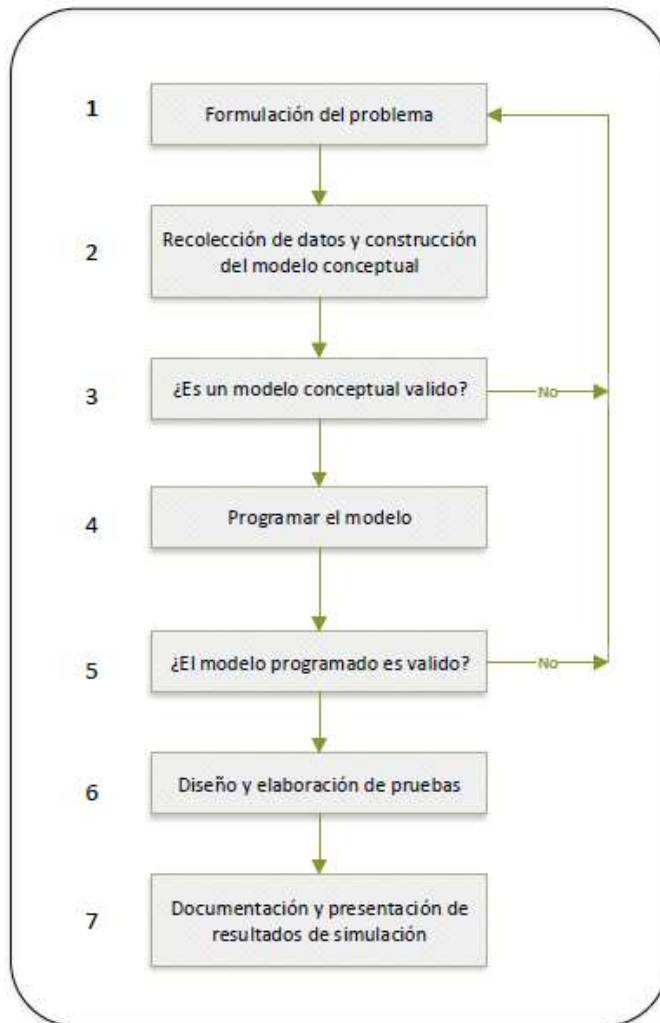


Figura 3. 1 Siete pasos para la realización de un estudio de simulación exitoso. Modificado de [54].

### 3.1 Selección de la herramienta de simulación.

Para el desarrollo de este trabajo de grado, es necesario utilizar una herramienta software que permita simular el comportamiento de una red OBS/DWDM, implementar un método cognitivo basado en una metaheurística híbrida para el submódulo de ensamble de ráfagas y analizar el desempeño de la red en términos de la probabilidad de bloqueo y el retardo extremo a extremo<sup>23</sup>.

<sup>23</sup> Tiempo que toma la ráfaga desde su nodo de origen hasta el nodo destino



A continuación se analizan las plataformas más reconocidas en el área de las redes de comunicaciones y que ofrecen la documentación, soporte y precisión en cuanto a rendimiento y escalabilidad necesarias.

### **NS-2 (Network Simulator 2):**

Esta herramienta de simulación es utilizada para investigación y educación. Es una de las herramientas de código abierto más confiable y de gran uso en el ámbito académico. Las principales desventajas de NS-2 son en cuanto al modelado de toda la red, debido a que es una tarea bastante complicada por lo que no presenta una interfaz gráfica que permita una experiencia agradable con el usuario. Por otra parte, se han presentado casos de inconsistencia con los resultados y errores en muchos de los protocolos existentes en la herramienta [55].

### **NS-3 (Network Simulator 3):**

Mediante esta herramienta, se recrea un entorno de simulación de redes para su estudio. NS-3 presenta mejoras respecto a NS-2, tales como la eliminación de problemas que resultan de la combinación de C++ con OTCL. Esta herramienta es *open-source* y permite la inclusión de otro software *open-source*, es escalable, modular y emulador. Presenta problemas como la compatibilidad con NS-2 y los protocolos que éste contiene [55], [56].

### **OPNET:**

Esta es una herramienta orientada a las comunicaciones que permite flexibilidad y escalabilidad en modelos jerárquicos, característica principal en redes reales. Estos modelos se clasifican en tres dominios denominados Red, Nodo y Procesos, los cuales están escritos en C++. Presenta una interfaz gráfica amigable al usuario lo que permite un sencillo uso de la herramienta pero, a pesar de esto, requiere a su vez, de gran cantidad de conocimientos previos en redes y programación. Siendo este un simulador comercial, requiere de una licencia anual de costo elevado para poder ofrecer todas las funcionalidades de la misma [56].

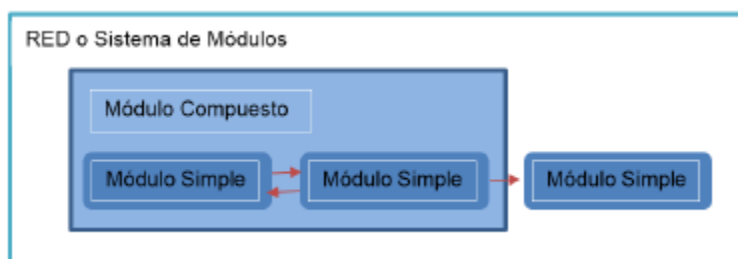
### **OMNeT++:**

OMNeT++ es un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE, *Integrated Development Environment*) que permite la simulación de redes en cualquier ambiente, por lo tanto es una suite completa para simulaciones orientadas a eventos discretos. Este es un potente software *open source* de licencia pública académica que permite la



simulación de redes en cualquier ambiente. Su estructura es modular de eventos discretos de redes orientada a objetos la cual tiene una organización de tipo jerárquica. Esta característica indica que cada elemento que se agregue a la red funciona como un módulo, el cual puede contener submódulos que se denominan módulos compuestos. De igual manera, existen módulos simples que contienen los algoritmos hechos en C++ por el usuario [57].

En la *figura 3. 2* se aprecia la jerarquía que se maneja en OMNeT++ como se mencionó anteriormente.



*Figura 3. 2 Jerarquía del simulador OMNeT++. Tomada de [20].*

La forma de conexión de los módulos es a través de puertos y estos se comunican mediante mensajes. Un mensaje es una estructura C++ específica de OMNeT++ que contiene variables para describir la información deseada [57]. Estas conexiones pueden ser utilizadas para modelar enlaces físicos con parámetros de análisis como la velocidad de datos, tiempo de propagación, tasa de paquetes perdidos, entre otros [55].

En cuanto a la definición de la red, OMNeT++ ofrece un lenguaje de alto nivel denominado Editor de Redes (NED, *Network Editor*). Por medio de este lenguaje se puede establecer la topología de la red, interconexión de los módulos, mensajes a utilizar, canales, parámetros, entre otros [57].

OMNeT++ presenta una interfaz gráfica compuesta por múltiples herramientas que permiten controlar la ejecución de la simulación mediante el cambio de variables. Además, presenta un ambiente agradable para la visualización del funcionamiento de la red.

En la *Tabla 3. 1* se observa la comparación entre las diferentes herramientas de simulación.



Tabla 3. 1. Parametrización de las herramientas de simulación. Adaptada de [55].

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

Con el fin de simular una red OBS/DWDM que permita la implementación de un método cognitivo basado en una metaheurística híbrida para el submódulo de ensamble de ráfagas, la herramienta más adecuada, según la tabla anterior es OMNeT++ ya que se caracteriza por ser un software flexible, orientada a eventos discretos, organizado y apto para la simulación de redes de interconexión de altas prestaciones. Esta herramienta de simulación no cuenta con módulos para redes OBS/DWDM, por lo tanto estos deben ser creados completamente.

#### **MATLAB:**

Es una herramienta de simulación que se utiliza como programa de cálculo matemático muy flexible y potente, tiene la característica de representación de datos gráficamente. Esta herramienta brinda la posibilidad de integrar nuevas funciones gracias a la amplia variedad de módulos con los que cuenta para ejecutar simulaciones con alto grado de complejidad.

#### **Origin PRO:**

Es un software científico utilizado ampliamente en el ámbito académico para realizar graficas de alta calidad y analizar los datos. Este software cuenta con características de diseño avanzado por medio de la cuales se puede realizar gráficos profesionales como la posibilidad de comparar diferentes datos establecidos, figuras en tercera dimensión, las cuales facilitan el análisis de la información.



### 3.2 Selección de las técnicas Metaheurísticas para el Ensamble de Ráfagas.

Para la selección de las técnicas metaheurísticas para el ensamble de las ráfagas se tuvieron en cuenta varios parámetros que permitieron una adecuada elección de las mismas. A continuación se describen los criterios que se tuvieron en cuenta para el proceso de ensamble.

**Clasificación de la metaheurística:** De acuerdo al problema que se busca abarcar, la escogencia de una u otra clasificación de las metaheurísticas es vital para dar una solución óptima.

- **Innovación:** Las técnicas metaheurísticas deben aportar una mejora en el desempeño de la red OBS/DWDM
- **Implementación en otras redes:** Como referencia es importante saber cuáles son las técnicas que han sido implementadas por otros simuladores en redes OBS/DWDM tanto en el ámbito académico como en el comercial. Debido a que permite analizar la factibilidad y complejidad de implementación a nivel de simulación.
- **Mitigación de probabilidad de bloqueo:** La técnica metaheurística debe mitigar la probabilidad de bloqueo que se presenta en la red OBS/DWDM.
- **Reducción de la pérdida de ráfagas:** La técnica metaheurística debe reducir la pérdida de ráfagas que se presenta en el núcleo de la red mediante la elección adecuada del tamaño de las mismas.
- **Desempeño:** Se debe comparar si los resultados obtenidos en el desempeño de la red, son mejores al implementar una técnicas metaheurística en el ensamble de ráfagas.

De acuerdo a los criterios de selección definidos, se eligieron dos metaheurísticas para formar la metaheurística híbrida: Redes Neuronales y Optimización por Enjambre de Partículas (ANN + PSO), debido a que son las más apropiadas según los criterios de selección.

En principio, las redes neuronales son una técnica ampliamente conocida y la cual ofrece buenos resultados en la solución de diferentes problemas. Se destaca por obtener su solución teniendo en cuenta ciertos parámetros de entrada que se definen de acuerdo al problema en cuestión, y realizando una operación sobre los





mismos. La base teórica de esta técnica indica que su implementación es factible y se tienen ejemplos de redes que ya la han implementado en simulación.

Optimización por Enjambre de Partículas es una técnica que al igual que las redes neuronales, ha sido utilizada en redes de telecomunicaciones, y que para este caso, se utilizará para determinar el tiempo y la longitud adecuada para el ensamble de ráfagas en el nodo de borde de la red. La implementación de esta técnica, comparada con redes neuronales es más sencilla de implementar con respecto a la codificación, pero se espera que en conjunto, se mejoren los resultados en cuanto a desempeño de la red.

### **3.3 Implementación de los módulos de la red EON basada en una red OBS/DWDM**

En este aparte del capítulo se describe el proceso de diseño e implementación de una red OBS/DWDM distribuida sobre la red EON, en donde se integra un método cognitivo basado en una metaheurística híbrida para el ensamble de ráfagas y de esta manera poder analizar el desempeño de la red en términos de probabilidad de bloqueo y el tiempo que le toma a la ráfaga en llegar desde su origen hasta el nodo destino. A continuación se realiza una descripción del nodo borde con sus correspondientes submódulos, los cuales permiten la caracterización de la red EON. En el nodo de borde se toma especial atención en el proceso de ensamble de ráfagas, tema central del presente trabajo de grado para establecer los parámetros de desempeño y así poder analizar el funcionamiento de la red implementada.

#### **3.3.1 Nodo de ingreso o frontera.**

El algoritmo que describe la red OBS/DWDM se ilustra mediante el diagrama de flujo en la *Figura 3. 3*, en donde inicialmente se crea el modulo fuente al cual se le denomina “App”, en dicho modulo se realiza una generación de paquetes de tamaño aleatorio tal y como se describe en el ANEXO B. Dichos paquetes se les asigna una dirección de origen, destino y tipo de servicio. Para la variable “Tipo de Servicio” se crearon tres clases: Voz, Video y Datos, los cuales se clasificaron por prioridad de ensamble, es decir, el servicio con mayor prioridad se ensambla primero, debido a que tolera un menor retardo, en este caso es el servicio de “Voz” el que tolera un menor retardo, seguido por el servicio “Video” y por último el servicio de “Datos”.

Posteriormente se desarrolló un módulo denominado “Routing”, el cual en base a la dirección de origen y destino identifica si el paquete tiene como destino un nodo local o foráneo, en caso de ser el destino del paquete un nodo foráneo se verifica



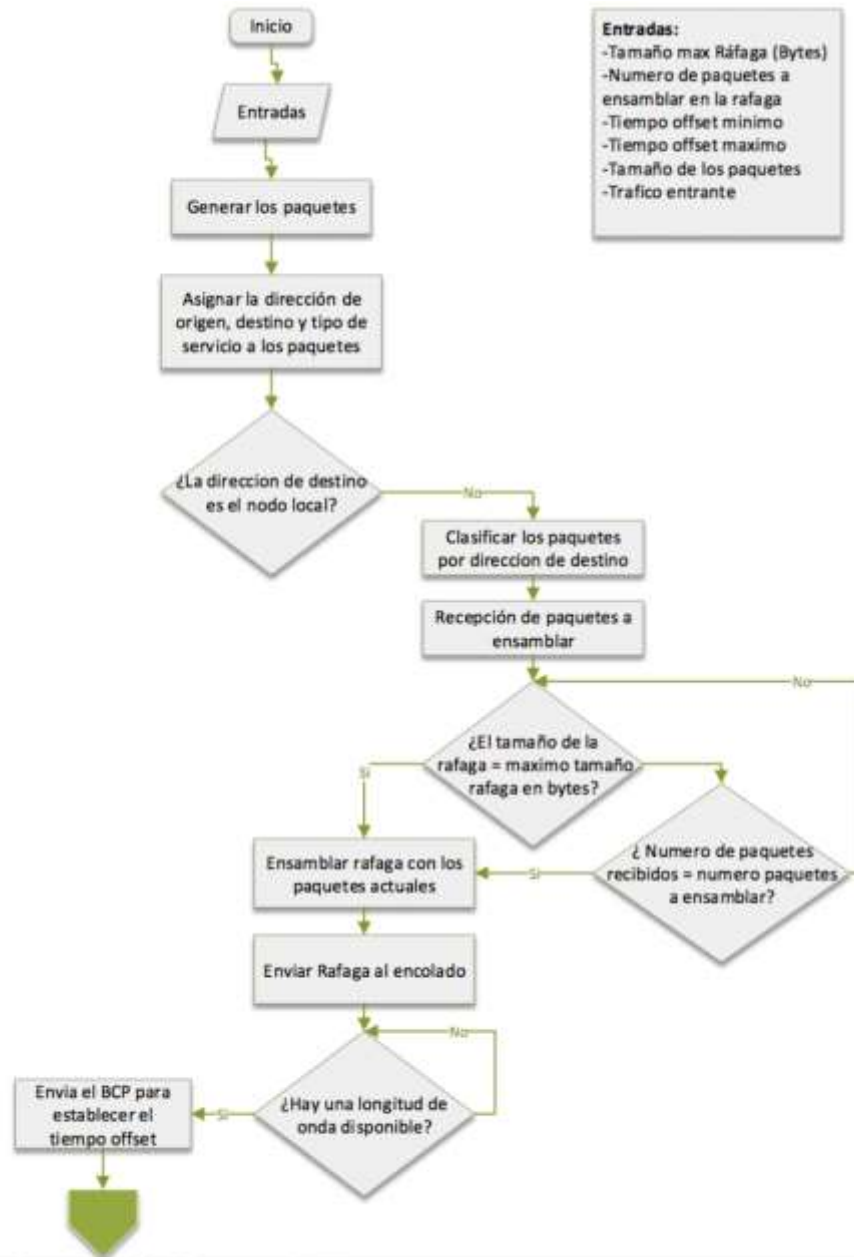
la mejor ruta disponible para transmitir el paquete y así alcanzar su nodo destino, estos paquetes se envían al nodo “Classific”, en donde se clasifica los paquetes por destino.

Una vez se haya clasificado los paquetes por destino, cada de estos se ensamblan en una ráfaga en el submódulo “Ensamble”, es en este es donde se conforma la ráfaga con paquetes con el mismo destino. Este ensamble de las ráfagas depende del tamaño de esta, es decir, el número de paquetes por los que está compuesta y/o tamaño máximo que ocupa una ráfaga medida en bytes, la cual se envía al submódulo “Queue” con el primer evento que ocurra. Estos dos parámetros se modifican desde el archivo de configuración descrito en el ANEXO B.

El submódulo “Queue” es el encargado ejecutar la reserva de recursos de la red mediante la estimación del tiempo offset para la transmisión. Esta reserva de recursos está basada en el esquema de señalización JET, el cual, como se mencionó anteriormente es el más utilizado en las redes OBS/DWDM. Este submódulo basa su funcionamiento en la transmisión de señales que informen el estado actual de red; entre las cuales se encuentran el tiempo de llegada de las ráfagas a su destino final, si la red está lista para transmitir otra ráfaga, entre otras funciones esenciales en el funcionamiento de la red descrito en el ANEXO B.

En el momento en que se recibe la ráfaga ensamblada, se busca una longitud de onda u horizonte apropiado para la transmitirla hacia un destino, haciendo uso del algoritmo LAUC, mencionado anteriormente. Posteriormente, se analiza si existe una longitud de onda disponible para enviar la ráfaga, el modulo “Queue” transmite la señal que indica el inicio del paquete de control por la longitud de onda dedicada (el primer camino disponible). Si el tiempo offset establecido no es suficiente para el envío de la ráfaga esta se descarta mediante el modulo “dropp”, si el tiempo es suficiente, se ejecuta la transmisión de la ráfaga a través de la longitud de onda asignada. Mientras está circulando la ráfaga a través de la red se presenta una eliminación aleatoria de ráfagas por contención en cada uno de los nodos intermedios por los que pase esta.

Una vez la ráfaga llegue a su nodo destino, el submódulo “Routing” verifica que su destino es el nodo local y envía esta al “App” en donde se clasifica las ráfagas según la longitud de onda asignada en el submódulo “Queue”; si se trata de un BCP, es enviado hacia la compuerta que lo comunica con el modulo “Unidad de Control” y si es una ráfaga, es enviada hacia la compuerta que corresponde al módulo “Matriz de conmutación” (OXC). Los submódulos “Unidad de Control” y la “Matriz de conmutación óptica” (OXC) se explican con mayor detalle en el ANEXO B.



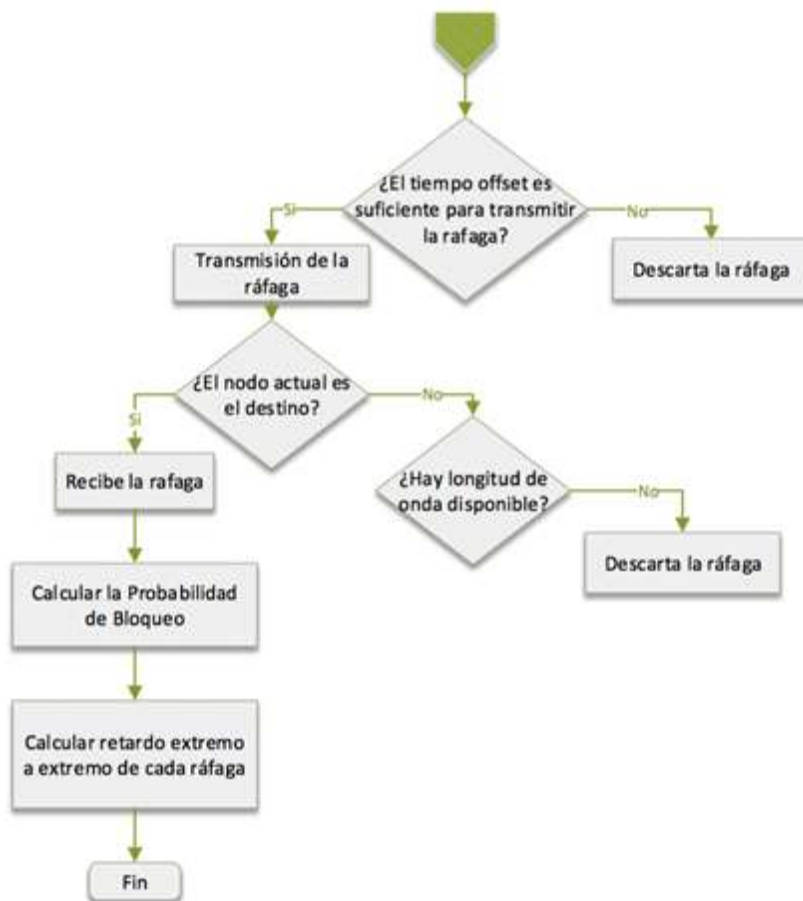


Figura 3. 3 Diagrama de Flujo del algoritmo. Por los autores.

En la *Figura 3. 4* se ilustra el nodo de borde o frontera con cada uno de los submódulos que lo conforman; El submódulo “App” es en donde se genera el tráfico que circula por la red OBS/DWDM, posteriormente se tiene el submódulo “Routing”, que es donde se verifica el destino de los paquetes para poder establecer la ruta que van a seguir a través de la red, una vez a los paquetes se les asigna la ruta por donde van a ser transmitidos, es necesario clasificarlos por su dirección de destino en el submódulo “Clasificador” para que sean ensamblados en una ráfaga en “Ensamble” y poder ser enviados al “Queue”, el cual reserva los recursos para transmitir la ráfaga.

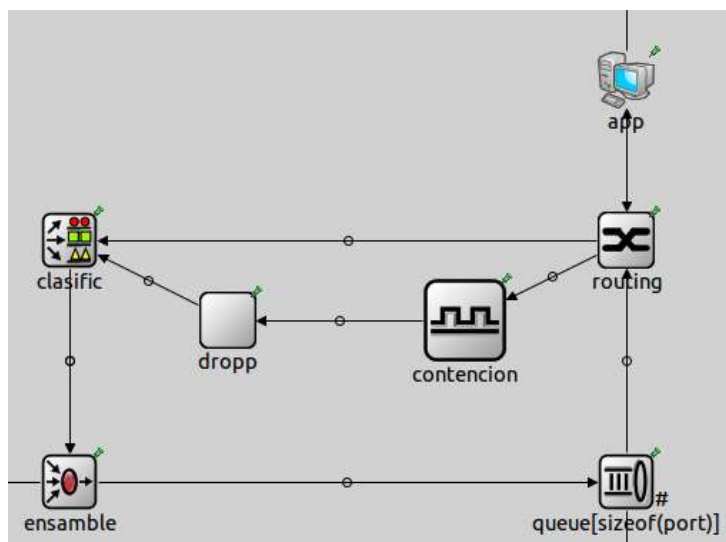


Figura 3. 4 Modulo Nodo Frontera en la IDE OMNeT++.

### 3.3.1.1 Implementación del Modelo de tráfico

La implementación del tráfico se encuentra en el submódulo “App”, en donde la generación de este ha sido modelada como el flujo de información (paquetes) que circula de un nodo a otro. La información que viaja a través de la red se puede representar ya sea en forma de paquetes (desde el generador hasta el ensamblador), los cuales se generan de forma aleatoria modelados mediante una distribución de probabilidad o a través de ráfagas (desde el ensamblador hasta el destino) con un número de paquetes determinado. Los dos elementos, en conjunto, forman un solo proceso cuya media es la tasa de bits promedio del flujo de tráfico.

En el modelo de red OBS/DWDM planteado en el presente trabajo de grado, los paquetes se generan de una manera aleatoria siguiendo una distribución de probabilidad tipo exponencial con media 0.2s, esta distribución suele utilizarse para modelar “*el tiempo que transcurre hasta que se produzca un determinado suceso*” [58], en donde dicho suceso es la generación de paquetes y el tiempo es la media de 0.2s.

En la *Figura 3. 5* se muestra la función densidad de probabilidad de la distribución exponencial, la cual constituye el escenario de simulación de Tráfico Alto de la red OBS/DWDM.

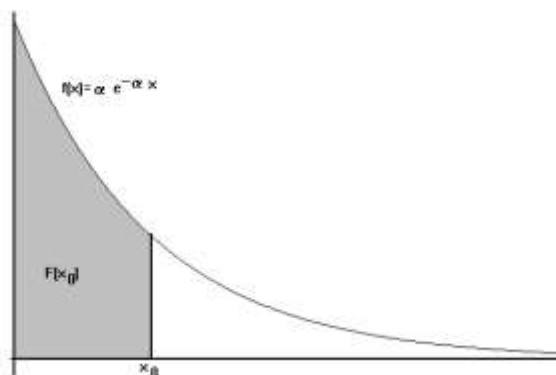


Figura 3. 5 Función densidad de probabilidad de una distribución exponencial. Tomada de [58].

El Tráfico Medio se modela mediante la distribución normal positiva con media 0.2s, es decir es modelada a través de una campana de gauss simétrica con respecto a la media tal y como se muestra en la Figura 3. 6.

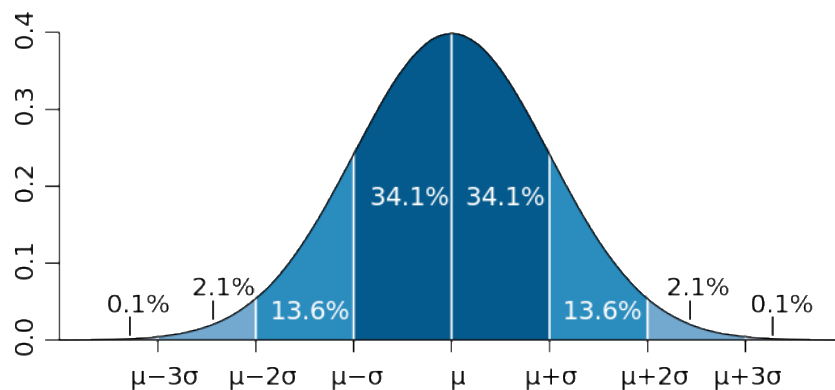


Figura 3. 6 Densidad de probabilidad alrededor de la media en una distribución  $N(\mu, \sigma^2)$ . Tomada de [58].

Como se puede apreciar en la anterior figura, la distribución normal depende de la desviación estándar ( $\sigma^2$ ), en donde se debe hallar este valor en función de la media 0.2s. Para esto es necesario hallar el valor esperado que se describe en la función densidad de probabilidad para una distribución normal planteado en la siguiente Ecuación 3.1:

$$E[Y] = \int_0^{\infty} y \frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-y^2}{2\sigma^2}} dy \quad (3.1)$$

Donde,

$\sigma^2$  Desviación estándar de la distribución normal.

$E[Y]$  Valor esperado de Y.



De donde se tiene un valor esperado expresado en la Ecuación (3.2)

$$E[Y] = \frac{2\sigma}{\sqrt{2\pi}} \quad (3.2)$$

Una desviación estándar expresada en la siguiente Ecuación (3.3)

$$\sqrt{V[Y]} = \sqrt{1 - \frac{4}{2\pi}} \sigma \quad (3.3)$$

Y finalmente reemplazando la Ecuación (3.2) en (3.3) se obtiene

$$\sigma^2 = 0.15s \quad (3.4)$$

Por último se tiene el Tráfico Bajo es modelado con la distribución de probabilidad uniforme  $U[0.1s, 0.3s]$ .

### **3.3.2 Implementación del Algoritmo de la Red Cognitiva con Metaheurística Híbrida (HMCNA, Hybrid Metaheuristic Cognitive Network Algorithm) para ensamblar las ráfagas de una red OBS/DWDM distribuida**

#### **3.3.2.1 Definiciones**

La implementación de HMCNA realizada en el presente trabajo de grado basa su funcionamiento en la búsqueda del número de paquetes por los que está conformada una ráfaga y su tamaño máximo en bytes, donde se busca mejorar el desempeño de una red OBS/DWDM distribuida al implementar un método cognitivo basado en una metaheurística híbrida. Para modelar este proceso dinámico de ensamble de ráfagas es necesario representar algunos conceptos teóricos de las metaheurísticas en términos del modelo general de una red OBS/DWDM.

**Entradas de HMCNA:** son el conjunto de datos que se le introduce a la ANN, los cuales corresponden a las variables de probabilidades de bloqueo y retardos extremo a extremo obtenidos del modelo general de red OBS/DWDM. Estos datos se toman como entradas de la Red Neuronal en su proceso de entrenamiento en la herramienta de simulación Matlab, previo a la integración con la red OBS/DWDM en el IDE OMNeT++ y posteriormente pasan a ser la población inicial de la metaheurística PSO, la cual se explicará en la sección 3.3.2.2.





**Salidas de HMCNA:** son los valores de salida de ANN asociados al número de paquetes y tamaño máximo con que se debe ensamblar las ráfagas en la red OBS/DWDM.

### 3.3.2.2. Funcionamiento Básico del Algoritmo

Para dar inicio a la aplicación de la ANN sobre la red óptica OBS/DWDM, se debe generar una serie de datos que conformen la población inicial. Con estos datos se procede a entrenar la red como se menciona en la sección 2.4. La modalidad de entrenamiento basa su funcionamiento en los pesos que se le asigna a cada entrada de la red, los cuales cuando están en etapa de aprendizaje toman diferentes valores en respuesta a un conjunto de ejemplos denominado grupo de entrenamiento [59].

En la implementación de la ANN se utilizó un Perceptrón MultiCapa (MLP, *Multi Layer Perceptron*). Una capa es un conjunto de neuronas cuyas entradas de información provienen de la misma fuente y cuyas salidas de la información se dirigen hacia el mismo destino [60].

La arquitectura de un MLP consta de tres capas; la capa de entrada, donde se recibe la información, la capa oculta cuyas entradas o salidas se encuentran dentro del sistema y por tanto no tienen contacto con el entorno y por último la capa de salida que envía la respuesta de la red al exterior tal y como se muestra en la *Figura 3. 7*.

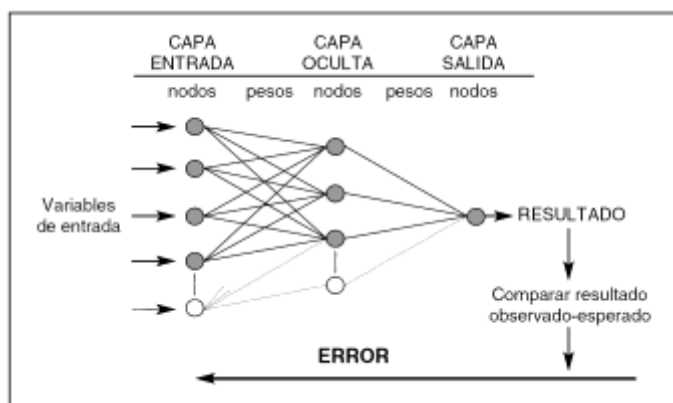


Figura 3. 7 Arquitectura de la red MLP. Tomada de [61]

Para ejecutar la etapa de simulación de la ANN se hizo uso del software matemático comercial Matlab [62], el cual brinda una herramienta de diseño denominada Herramienta de Red Neuronal (NNTool, *Neural Network Toolbox*) [63].





El primer paso es obtener la población inicial, compuesta por las variables de probabilidades de bloqueo y retardos extremo a extremo que se obtienen de la red OBS/DWDM, se realizaron 100 simulaciones cada una de estas con 200 datos, cien de estos correspondientes a la probabilidad de bloqueo y los otros cien a los retardos cada diez milisegundos en un intervalo de un segundo de simulación.

Los datos de población inicial se configuran como entradas de la red neuronal, la cual se diseñó con tres capas; una de entrada, una de salida y una oculta, esto se pudo establecer gracias al teorema de Kolmogorov [64] [65], el cual demuestra que con una capa oculta aproxima todas las funciones de una manera óptima. La capa oculta está compuesta por tres neuronas y la capa de salida por dos neuronas correspondientes al número de paquetes y tamaño máximo con que se debe ensamblar las ráfagas.

Una vez definidos las entradas de la red neuronal con sus correspondientes salidas deseadas se procede a modelar la red a utilizar con la herramienta NNTool. Para esto se utilizaran dos funciones de activación; para la capa externa se utiliza la función lineal y de la misma manera para capa interna se utiliza la función Sigmoidea definida en la siguiente ecuación y en la *Figura 3. 8* se ilustra la arquitectura del MLP.

$$y = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad [-1, +1] \quad (3.5)$$

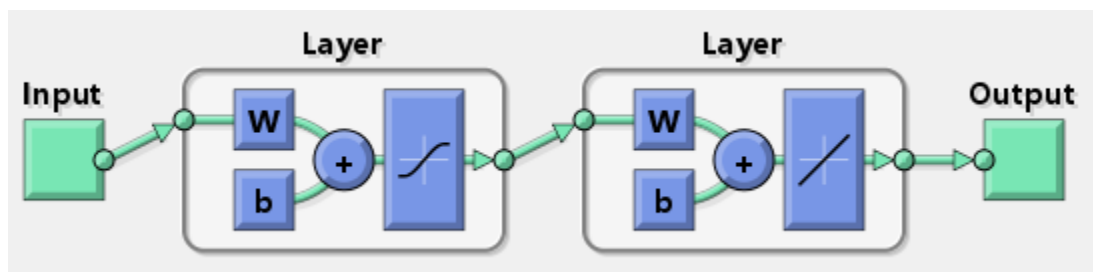


Figura 3. 8 Arquitectura de MLP. Tomada de [62]

La operación del MLP con una capa oculta y neuronas de salida lineal como se observa en la *Figura 3. 8* se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$Z_k = g\left(\sum_j w'_{kj} f\left(\sum_i w_{ji} x_i - \theta_j\right) - \theta'_k\right) \quad (3.6)$$



Donde,

$Z_k$	Salidas de la capa final.
$x_i$	Las entradas de la red.
$w_{ji}$	Son los pesos de la capa oculta.
$\theta_j$	Umbrales de la capa oculta.
$w'_{kj}$	Los pesos de la capa de salida.
$\theta'_k$	Umbrales de la capa de salida.
$f(.)$	Función de tipo Sigmoidea
$g(.)$	Función de tipo lineal.

Una vez realizado el entrenamiento y obtenidos los pesos de las diferentes capas, se procede a exportar el algoritmo de la herramienta de simulación Matlab a OMNeT++ para integrarlo con la red OBS/DWDM. En la *Figura 24* se observa la red OBS/DWDM distribuida al integrar el módulo de la metaheurística híbrida.

Finalmente, se integra la metaheurística PSO, la cual, como se dijo anteriormente, requiere de una población inicial, que para este caso serán tanto las probabilidades de bloqueo como los retardos obtenidos en el entrenamiento de la red neuronal. Seguido de esto, cada que se obtengan los nuevos retardos y probabilidades de bloqueo, generados periódicamente, se realiza una comparación de estos datos actuales, con los que se tenían inicialmente. Si uno de los datos tiene un retardo más alto o una probabilidad de bloqueo mayor a la que se tenía en el evento pasado, se actualiza dicho valor por el mejor obtenido, de lo contrario, no se actualiza dándole conectividad a la red. Después de esto, se tiene la siguiente población, la cual entrará nuevamente a la red neuronal para repetir el proceso que esta cumple. En la *Figura 3. 9* se muestra el modelo de red que se simuló en la herramienta OMNeT++ y el diagrama de flujo que lo describe.

Lo anterior le brinda cognitividad a la red debido a que constantemente está observando las variables de probabilidades de bloqueo y retardo extremo a extremo disponibles en su entorno, para posteriormente realizar el proceso de aprendizaje, en donde se adapta frente a cambios de su entorno y decide que variables de configuración tomar para el ensamble de ráfagas en la red OBS/DWDM. Cada uno de estos pasos están comprendidos dentro del ciclo de radio cognición expuesto en la sección 2.3.

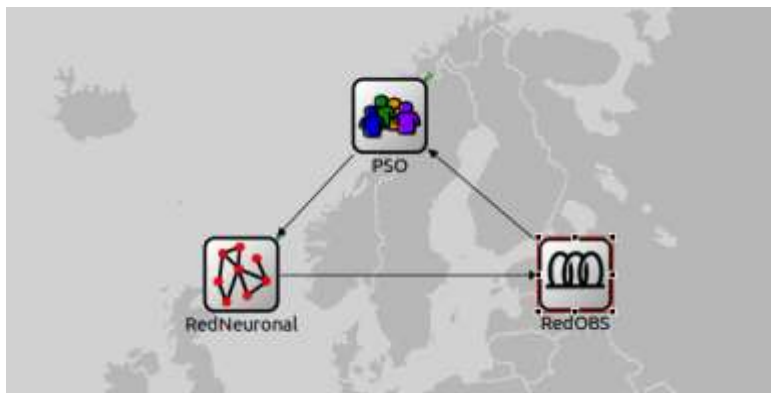


Figura 3. 9 Modelo de la red HMCNA.

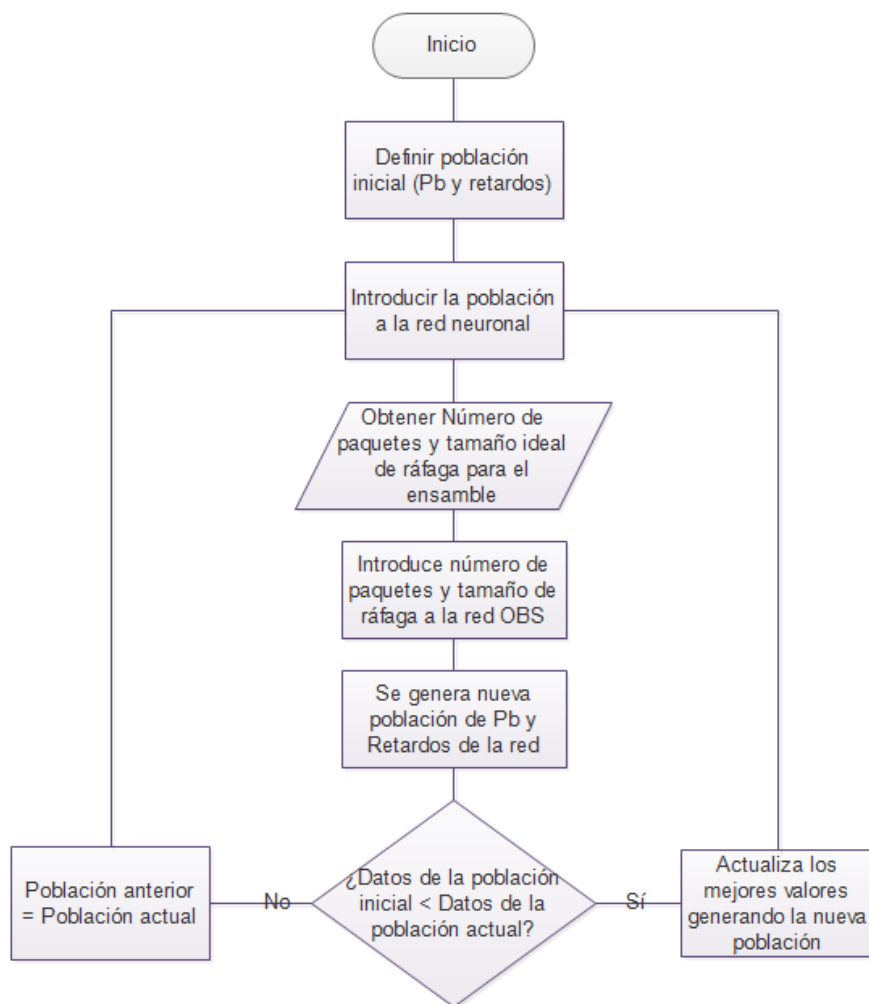


Figura 3. 10 Diagrama de flujo que describe el funcionamiento de HMCNA. Por los autores.



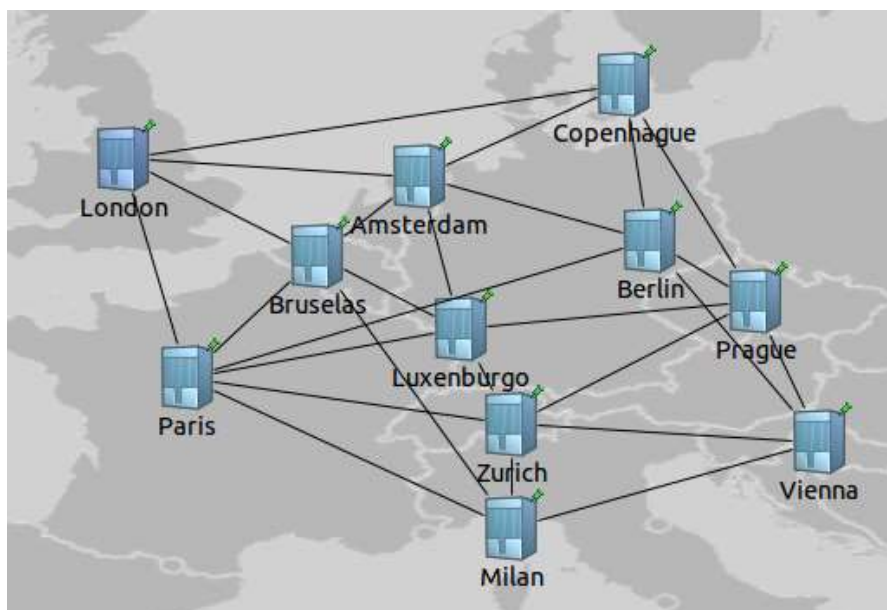
### 3.3.3. Modelo de la Red Europea EON

Para el desarrollo del simulador se trabajó sobre la red EON, la cual está compuesta por once nodos, veintiséis conexiones bidireccionales cuyo enlace más corto es de 173 y el más largo de 954 kilómetros. En la *Tabla 3. 2* se muestra las características esenciales en el diseño de la red EON.

*Tabla 3. 2 Parámetros de la red*

Parámetros	Medida
Distancia entre enlaces	173km - 954 km
Numero de nodos	11
Numero de enlaces bidireccionales	26
Numero de $\lambda$	4

Esta red se modeló en la herramienta de simulación OMNeT++, abstrayendo cada uno de sus componentes y caracterizándola con la metaheurística híbrida para el proceso de ensamble de ráfagas. Posterior a la elección de la topología, los submódulos creados en la sección 3.3.1 correspondiente al nodo de frontera. Estos nodos se ubican en ciudades predefinidas del mapa del continente Europeo para formar la topología de la red. La herramienta OMNeT++ proporciona mapas de diferentes regiones del mundo; se hace uso del mapa de Europa como se muestra en la *Figura 2. 12* en donde se definen las distancias de los enlaces.



*Figura 3. 11 Red EON OBS/DWDM Implementada.*



## **CAPÍTULO 4: CASOS DE ESTUDIO**

### **4.1. Introducción**

En este capítulo se describen los escenarios de simulación definidos para el estudio del desempeño de la red EON OBS/DWDM en términos de la probabilidad de bloqueo y retardo extremo a extremo al integrar un método cognitivo basado en una metaheurística híbrida para el ensamble de ráfagas.

Es importante aclarar la incidencia de los dos parámetros escogidos para la evaluación del desempeño en el presente trabajo de grado. Tanto la probabilidad de bloqueo como el retardo extremo a extremo influyen directamente en la medida del throughput, siendo este la tasa de éxito de entrega de mensajes (para este caso ráfagas) sobre un canal de comunicación. Por lo anterior, si la probabilidad de bloqueo que se tiene en la red es alta debido a que se pierden una gran cantidad de ráfagas, el throughput será bajo; de igual manera, si el retardo extremo a extremo que sufren las ráfagas es elevado, es posible que algunos paquetes o toda una ráfaga completa deba ser descartada dados los retardos máximos tolerables de las mismas, por tanto, la probabilidad de bloqueo aumenta y el throughput de la red disminuye.

El desempeño de la red, de acuerdo a los términos mencionados anteriormente, es necesario evaluarlo desde varios puntos de vista, pero para el desarrollo de este trabajo de grado, se evaluó de acuerdo a la longitud de la ráfaga, donde se buscó obtener un tamaño adecuado para su ensamble y por tanto mejorara el desempeño total de la red.

### **4.2. Casos de Simulación**

Para el estudio de este trabajo de grado se generaron dos casos de simulación para determinar la eficiencia de la metaheurística híbrida sobre el ensamble de ráfagas. Una vez definidos los escenarios de simulación se procede a realizar el montaje de estos, configurando los parámetros de desde el archivo de configuración .ini descrito en el ANEXO D

#### **4.2.1. Caso 1: Red EON con implementación de algoritmo de ensamble por longitud o número de paquetes, lo que ocurra primero.**

El algoritmo de ensamble de ráfagas en longitud utilizado en este caso fue descrito anteriormente en la sección 2.2.1.1.2.



#### **4.2.2. Caso 2: Red EON con implementación del método cognitivo basado en una metaheurística híbrida.**

El algoritmo a utilizar es el basado en la metaheurística híbrida para el proceso de ensamble. Este fue detallado en la sección 3.3.2.

#### **4.2.3. Sub Casos de Simulación**

Se escogieron dos variables fundamentales para observar el cambio en el desempeño de la red con respecto a la técnica de ensamble de ráfagas que se utilice en los nodos borde. Estas son, la tasa de tráfico de paquetes entrantes a la red OBS, puesto que es un factor que determina el tamaño de la ráfaga y la calidad de servicio de cada uno de los paquetes, esta última característica de la red define el retardo máximo que puede tolerar un paquete para llegar a su destino.

La tasa de tráfico introducida a la red se define mediante una distribución de probabilidad, tal y como se mencionó en la sección 3.3.1.1. Para visualizar el efecto que tiene variar el tráfico en la red se genera los siguientes sub casos de simulación.

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

Se configuró la red con una distribución de probabilidad exponencial, la cual define una alta tasa de llegadas de paquetes al ensamblador.

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

Para el subcaso 2, se toma una tasa de tráfico media descrita por la distribución normal.

##### **Sub caso 3**

En esta simulación, la tasa de tráfico de paquetes que se tendrá para observar el desempeño de la red es baja.



Tabla 4. 1 Escenario y casos de simulación.

Escenario de Simulación		
Escenario: Topología de red EON		
Casos de Simulación		
Caso 1	Caso 2	
Red OBS EON sin implementación de alguna metaheurística	Red OBS EON con implementación de metaheurística híbrida	
Sub casos de simulación		
Tasa de tráfico de paquetes alta	Tasa de tráfico de paquetes media	Tasa de tráfico de paquetes baja

### 4.3 Parámetros de Configuración para los Escenarios de Simulación

Los parámetros que se configuraron para las diferentes pruebas de simulación se presentan en la *Tabla 4. 2* En ella se identifican las variables que afectan tanto directa como indirectamente el desempeño de la red y de igual manera, los resultados de las diferentes simulaciones.

En cuanto a los nodos de la red, cada uno de estos fue configurado para que generara un flujo de tráfico y de esta manera, se simulara un alta, media o baja tasa de tráfico cursando por la red en diferentes instantes de tiempo.

Tabla 4. 2 Variables configuradas para el enlace de comunicación de la red.

Utilizando los algoritmos de ensamble de ráfagas: HMCNA o por tamaño	
Tipo de multiplexación	WDM
Número de longitudes de onda	4
Capacidad del canal	2.5Gbps
Espaciamiento de canalización	0.8nm
Modelo del tamaño del paquete	Distribución uniforme.
Protocolo de señalización	JET
Algoritmo de planificación	LAUC

Para realizar las diferentes pruebas de simulación y toma de datos, se utilizaron 5 equipos de cómputo, en los que se instaló el IDE OMNeT++. Se realizaron 20 iteraciones por cada caso de simulación, cada una con un tiempo de simulación de un segundo. Las características de los equipos empleados en la simulación se observan en la *Tabla 4. 3*.





Tabla 4. 3 Descripción de los equipos utilizados.

Equipos utilizados	
ASUS A45V	Intel Core i5, Ram 8Gb
Macbook Pro Retina Display	Intel Core i5, Ram 8 Gb
Hp	Intel Core i5, Ram 4 Gb
Toshiba	Intel Core i7, Ram 16 Gb
Sony	Intel Core i3, Ram 4Gb

### 4.3. Ejecución de las Simulaciones

Una vez ejecutadas las configuraciones propias de cada modelo de simulación se procede a realizar las simulaciones sobre la IDE OMNeT++, en donde se realizó una variación del tráfico introducido en la red y la velocidad de los enlaces (o canales) DWDM desde 1Gbps a 40Gbps.

Además a esto se realizaron 100 simulaciones por cada tráfico variando el número de paquetes y el tamaño máximo de estos en una ráfaga. Después de realizado esto, se analizaron las variables de desempeño para establecer el mejor caso (relación entre la menor probabilidad de bloqueo y retardo extremo a extremo) de ensamble de la ráfaga en la red OBS/DWDM sin el algoritmo HMCNA y de esta manera obtener la población inicial que se va a introducir al algoritmo.

### 4.4 Análisis de Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos y el análisis respectivo de las pruebas realizadas a la red EON OBS/DWDM con la implementación del algoritmo HMCNA.

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

Se simuló la red en la herramienta IDE OMNeT++, donde se realizaron las configuraciones respectivas para la implementación del modelo de red OBS con y sin el algoritmo HMCNA.

Se obtienen las gráficas de desempeño para el primer caso de simulación. En las *figuras 27, 28 y 29* se muestra el entrenamiento del algoritmo HMCNA para el caso de simulación de alto tráfico, siguiendo con la *figura 30* se ilustra la probabilidad de bloqueo con respecto al tráfico y por último en la *figura 31* en donde se ilustra el retardo con respecto al tráfico.



La técnica de Validación Cruzada es de vital importancia, donde se tienen tres conjuntos: de entrenamiento, validación y de test final ilustrados en las Figuras 4. 1, 4. 2, 4. 3 respectivamente. Los patrones utilizados para el entrenamiento de la Red Neuronal se reparten aleatoriamente entre los tres grupo en la proporción de 60%, 20% y 20% [51].

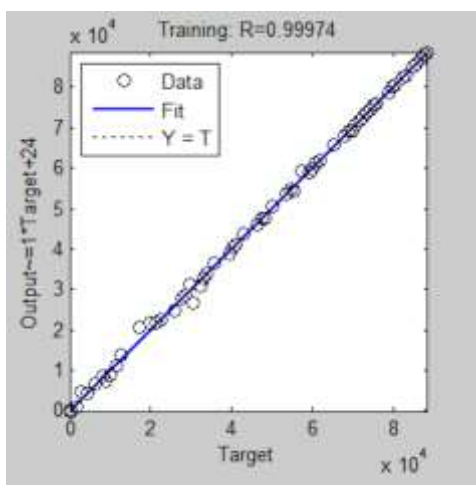


Figura 4. 1 Entrenamiento de la red OBS/DWDM con el algoritmo HMCNA para tráfico alto.

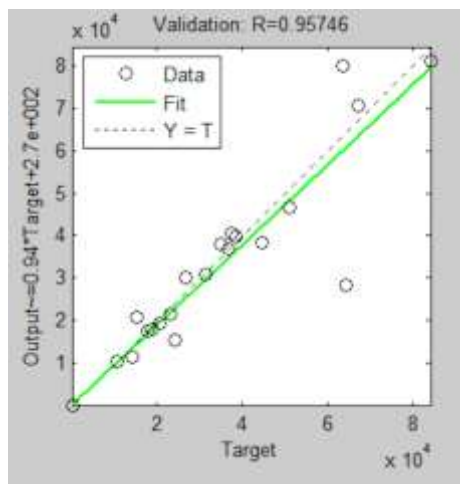


Figura 4. 2 Validación del entrenamiento de la red OBS/DWDM con el algoritmo HMCNA para tráfico alto

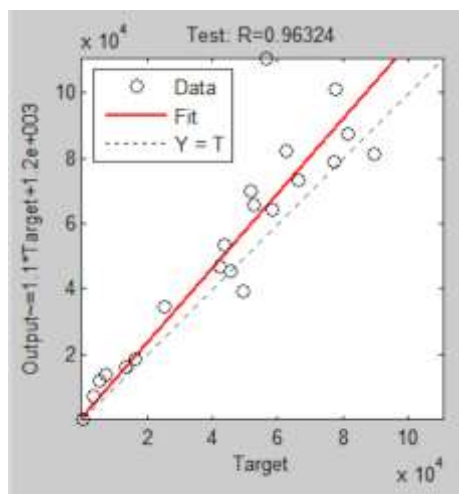


Figura 4. 3 Prueba del entrenamiento de la red OBS/DWDM con el algoritmo HMCNA para tráfico alto.

En las Figuras 4. 1, 4. 2, 4. 3, se muestran los procesos de entrenamiento, validación y test que ejecuta la Red Neuronal, cada una de estas tiene un coeficiente de correlación “R”, el cual es un indicador de la confiabilidad del proceso de aprendizaje de la red, en donde como se mencionó anteriormente tiene que ser un valor muy cercano a 1 pero no puede nunca tomar este valor debido a que en este caso la red estaría sobre entrenada. De los resultados obtenidos se puede apreciar que la red se entrenó de una manera correcta y arrojó buenos resultados en el proceso de validación con un  $R = 0,95746$  y un  $R = 0,96324$  en el proceso de Test.

El proceso realizado a los datos obtenidos en las diferentes simulaciones para la obtención de las gráficas de desempeño de la red se describe a continuación.

El cálculo de la probabilidad de bloqueo se realiza mediante la medición de las ráfagas perdidas y generadas en la red. Estos datos se toman una vez ejecutada la simulación y definen la Ecuación (4.1):

$$P_b = 1 - \frac{R_p}{R_g} \quad (4.1)$$

Donde,

- |       |                                   |
|-------|-----------------------------------|
| $P_b$ | Probabilidad de bloqueo en la red |
| $R_p$ | Ráfagas perdidas                  |
| $R_g$ | Ráfagas generadas                 |



El tráfico en la red OBS/DWDM implementada, se modela mediante la fórmula de Erlang B, esto es debido a que la red basa su funcionamiento en un sistema con pérdidas, es decir, las ráfagas no pueden esperar a que haya un canal disponible para ser transmitidas, es por esto que dado el caso de no haber recursos disponibles sobre la red, se descartan las ráfagas. En la Ecuación (4.2) se define la fórmula para la obtención del tráfico cursante en la red:

$$P_b = B(A, Rg) = \frac{\frac{A}{Rg!}}{\sum_{i=0}^{Rg} \frac{A^i}{i!}} \quad (4.2)$$

Donde,

$P_b$	Probabilidad de bloqueo en la red
$B(.,.)$	Función Erlang B
$A$	Tráfico cursado en la red
$Rg$	Ráfagas generadas

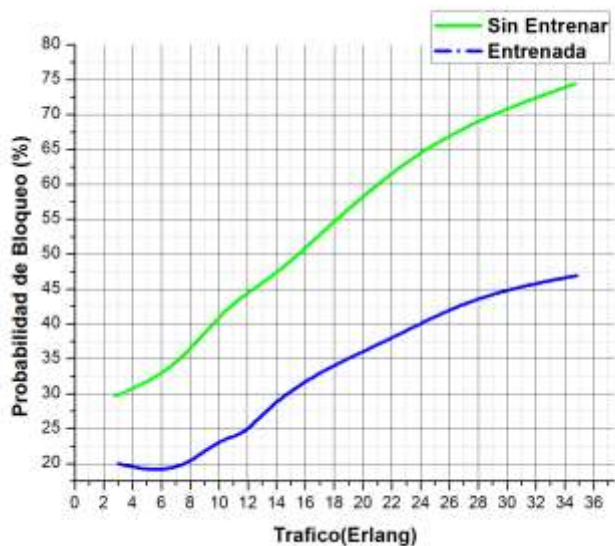


Figura 4. 4 Probabilidad de Bloqueo para un tráfico alto

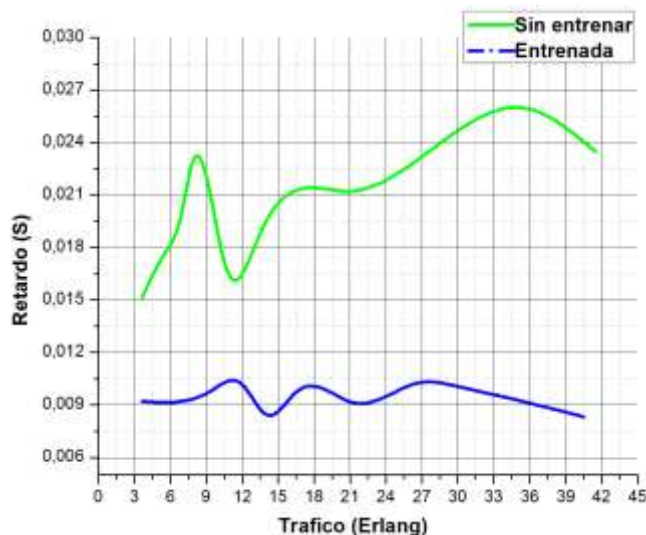


Figura 4. 5 Retardo Extremo a Extremo para un tráfico alto.

El comportamiento observado en la *Figura 4. 4*, muestra la tendencia de aumentar la probabilidad de bloqueo a medida que aumenta el tráfico sobre la red, tanto para los resultados obtenidos con el algoritmo HMCNA como para los de la red estándar. Esto se puede explicar dado que al aumentar el tráfico, la asignación de los recursos de la red en cuanto a definición de ruta y asignación de longitud de onda, horizonte más cercano, entre otros, es más compleja, por lo que la planificación que se debe hacer en cada nodo incrementa a medida que aumenta el tráfico.

En las *Figuras 4. 4 y 4. 5* se evidencia que al aplicar el algoritmo HMCNA (red Entrenada) a la red OBS, se obtiene una mejor respuesta del sistema de red OBS, lo cual se evidencia en los valores obtenidos para la probabilidad de bloqueo y el retardo extremo a extremo que experimentan las ráfagas a lo largo de la simulación, con respecto a la red estándar (red Sin Entrenar). Por un lado, mientras que la probabilidad de bloqueo más alta obtenida en la red sin entrenar es de aproximadamente 75 % para un tráfico de 35 Erlangs; al entrenar la red con el algoritmo expuesto anteriormente, para el mismo tráfico, se experimenta una probabilidad de bloqueo de aproximadamente 47 %, una disminución del 28 %. Por otro lado, al analizar el retardo extremo a extremo, se tiene que, para la red sin entrenar, el mayor retardo obtenido fue de aproximadamente 0,026 segundos para un tráfico de 34 Erlangs, y para la red entrenada, para el mismo tráfico, el mayor retardo alcanzado fue de aproximadamente 0,09 segundos, una disminución de 0,017 segundos.



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

Para este caso de simulación, en las figuras 4. 6 y 4. 7, se muestran los resultados obtenidos de probabilidad de bloqueo y retardo extremo a extremo respectivamente, al tener un tráfico medio, modelado con la distribución Normal de probabilidad.

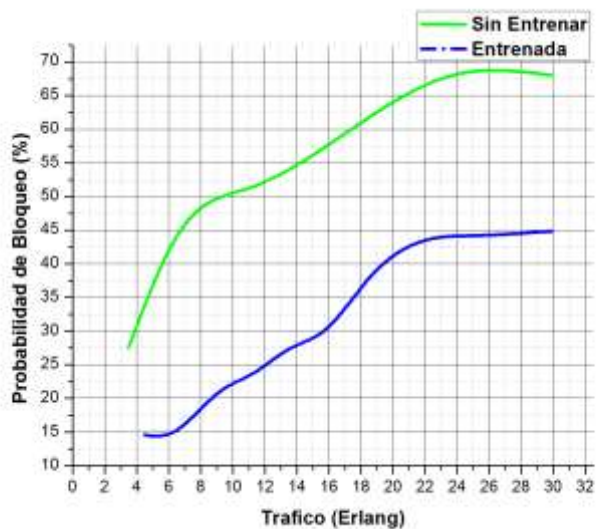


Figura 4. 6 Probabilidad de Bloqueo para un tráfico medio

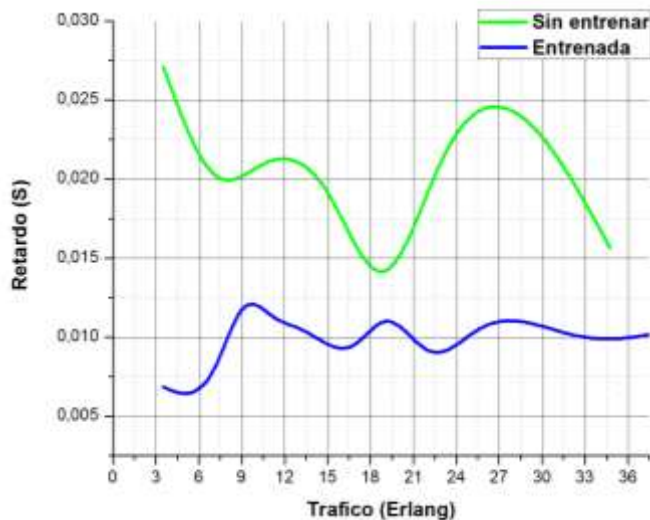


Figura 4. 7 Retardo Extremo a Extremo para un tráfico medio.



Al igual que el caso del tráfico alto se observa en la *Figura 4. 6* la tendencia a aumentar la probabilidad de bloqueo con respecto al tráfico con y sin la implementación del algoritmo HMCNA.

De la misma manera en las *figuras 4. 6 y 4. 7* se muestra la evidente mejora al desempeño de la red cuando se implementa el algoritmo HMCNA, tanto para la probabilidad de bloqueo como para el retardo extremo a extremo que experimentan las ráfagas. En el primer caso la probabilidad de bloqueo que experimenta la red “sin entrenar” es de aproximadamente 67% para un tráfico de 30 Erlangs, mientras que la red “Entrenada” para el mismo tráfico tiene una probabilidad de bloqueo de aproximadamente 45%, mostrando una mejora en el desempeño de la red de aproximadamente 22%. Por otro lado al analizar el retardo extremo a extremo que experimenta la ráfaga para llegar a su destino, en la simulación se puede observar una disminución de 0,02 segundos de la red “Entrenada” con respecto a la red “Sin Entrenar” con el mismo tráfico.

Los resultados de simulación de la red experimentando un tráfico alto con respecto al introducir un tráfico medio muestra que a medida que aumenta el tráfico introducido a la red, incrementa la probabilidad de bloqueo de esta.

#### **4.4.3 Simulación caso 1 y 2, Sub caso 3**

En este último caso de simulación, para un tráfico bajo modelado con la distribución Uniforme de probabilidad, se muestran los resultados de probabilidad de bloqueo y retardo extremo a extremo en las *Figuras 4. 8 y 4. 9*. Posterior a esto, se hace un análisis del desempeño del algoritmo HMCNA al variar la tasa de velocidad de los canales ópticos en la red.



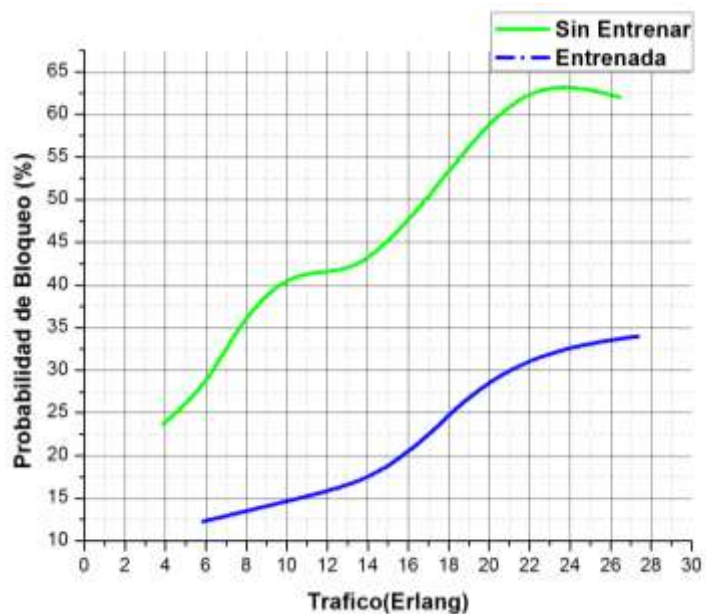


Figura 4. 8 Probabilidad de Bloqueo para un tráfico bajo.

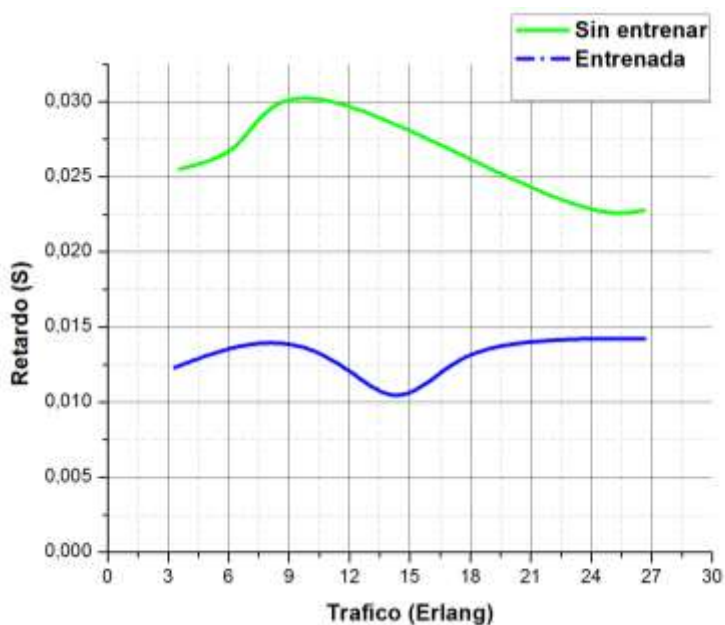


Figura 4. 9 Retardo Extremo a Extremo para un tráfico bajo.

Se aprecia en la *Figura 4. 8*, que al igual que en los otros dos casos de tráfico medio y alto, la probabilidad de bloqueo aumenta a medida que aumenta el tráfico en la red, debido a que cuando circula una mayor cantidad de información en la red, esta se congestiona aumentando la probabilidad de que se pierdan las ráfagas y que ocurra un mayor número de contenciones en los nodos intermedios. Al comparar

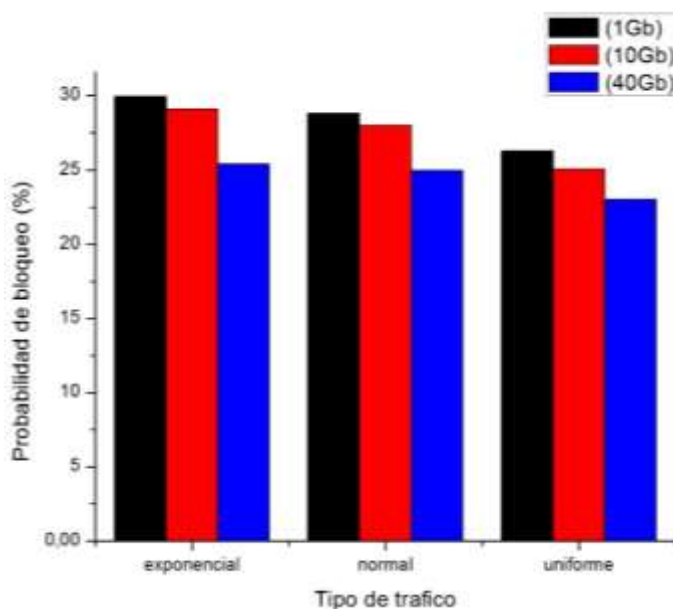




los resultados de simulación de los tres tráficos (alto medio y bajo) se evidencia una vez más el aumento de la probabilidad de bloqueo con respecto al tráfico.

En la *Figura 4. 9* se evidencia la disminución del retardo extremo a extremo al implementar el algoritmo HMCNA, esto quiere decir que este algoritmo mejora el desempeño de la red con respecto al tiempo que le toma a una ráfaga llegar a su destino es menor en la red “Entrenada”. Cabe aclarar que los retardos extremo a extremo de los tres casos de estudio (tráfico alto, medio y bajo) no tienen una tendencia, esto se debe a que las ráfagas se generan de una manera aleatoria con destinos aleatorios y el tiempo que le toma a estas en llegar al nodo final tiene el mismo comportamiento.

Las *figuras 4. 10* y *4. 11* permiten analizar el desempeño del algoritmo HMCNA cuando en los enlaces ópticos se tienen distintas velocidades (1Gb, 10Gb y 40Gb). El desempeño de la red en este caso se mide en términos de la probabilidad de bloqueo



*Figura 4. 10 Efecto de la variación de la velocidad de transmisión en la red sin el algoritmo HMCNA.*

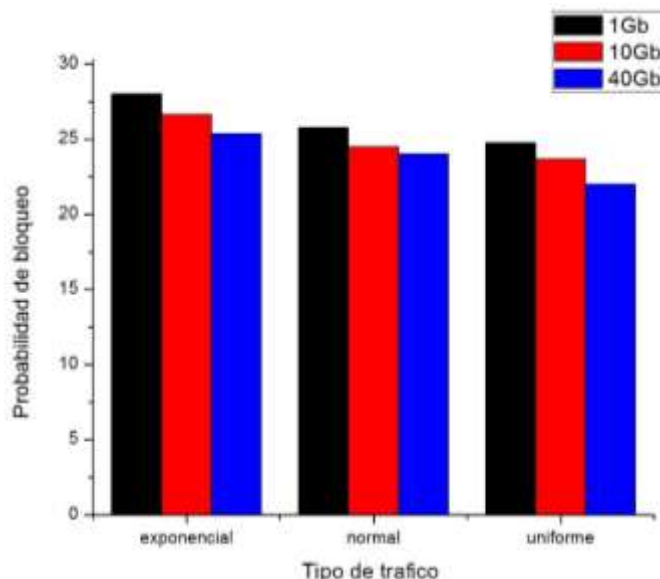


Figura 4. 11 Efecto de la variación de la velocidad de transmisión en la red con el algoritmo HMCNA.

Para velocidades mayores se obtienen mejores respuestas en cuanto a probabilidad de bloqueo, ya que el tiempo de transmisión de una ráfaga entre dos nodos se define como el cociente entre el tamaño de la ráfaga sobre la velocidad de transmisión. Esto implica que a mayores tasas de velocidad, la ráfaga tarda menor tiempo en viajar por los enlaces ópticos, por lo que se van a liberar más rápido los recursos de la red logrando menores pérdidas de ráfagas. Como se observa en la *Figura 4. 11* la probabilidad de bloqueo disminuye a medida que se aumenta las velocidades de los enlaces ópticos y de igual manera disminuye si se tienen tráficos bajos.

De los resultados obtenidos en las gráficas, los valores de probabilidad de bloqueo disminuyen para el algoritmo HMCNA en los 3 resultados, en donde se infiere que con la implementación de la metaheurística híbrida es posible obtener un mejor desempeño de la red

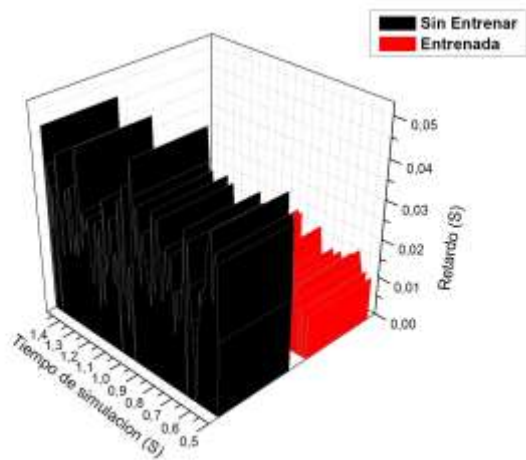


Figura 4. 12 Retardo Extremo a Extremo de la red con tráfico alto – 3D

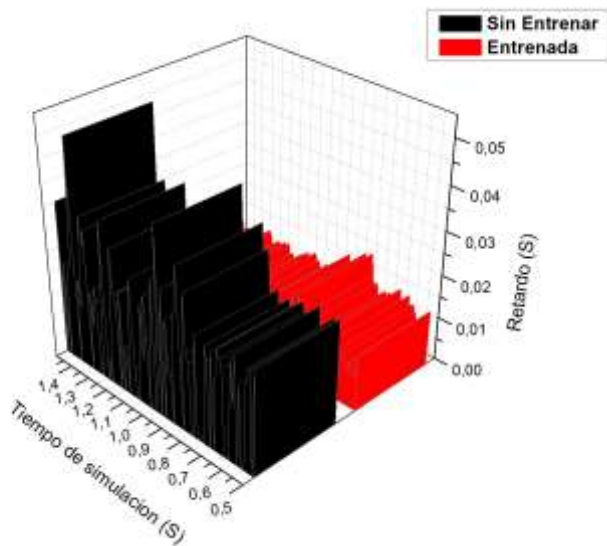


Figura 4. 13 Retardo Extremo a Extremo de la red con tráfico medio – 3D

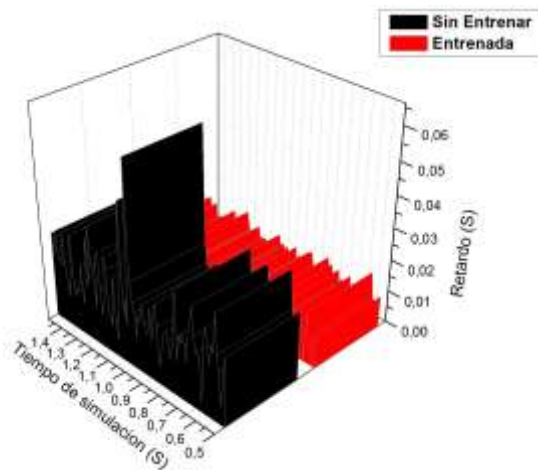


Figura 4. 14 Retardo Extremo a Extremo de la red con tráfico bajo – 3D

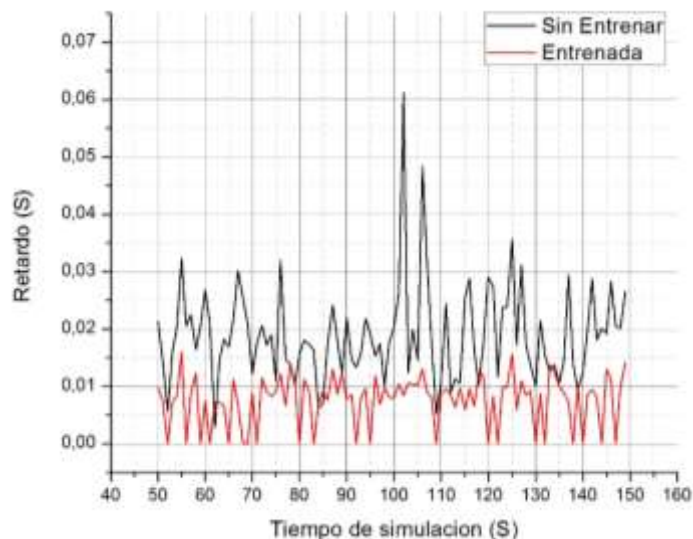


Figura 4. 15 Retardo Extremo a Extremo con tráfico alto – lineal

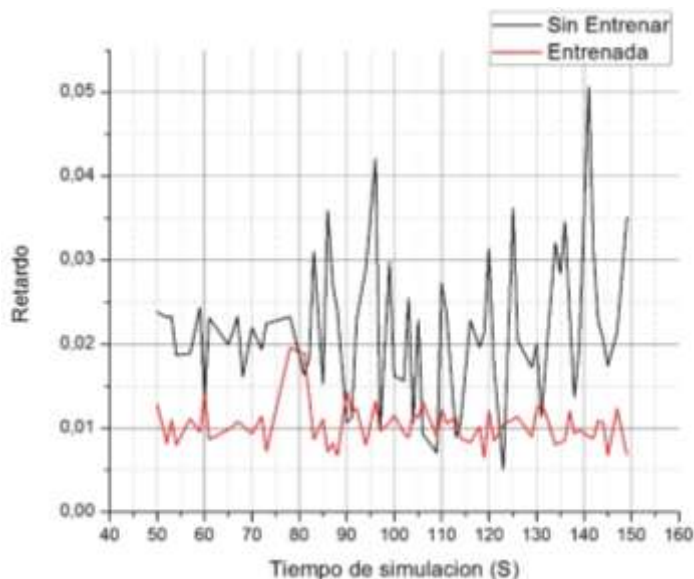


Figura 4. 16 Retardo Extremo a Extremo con tráfico Medio – lineal

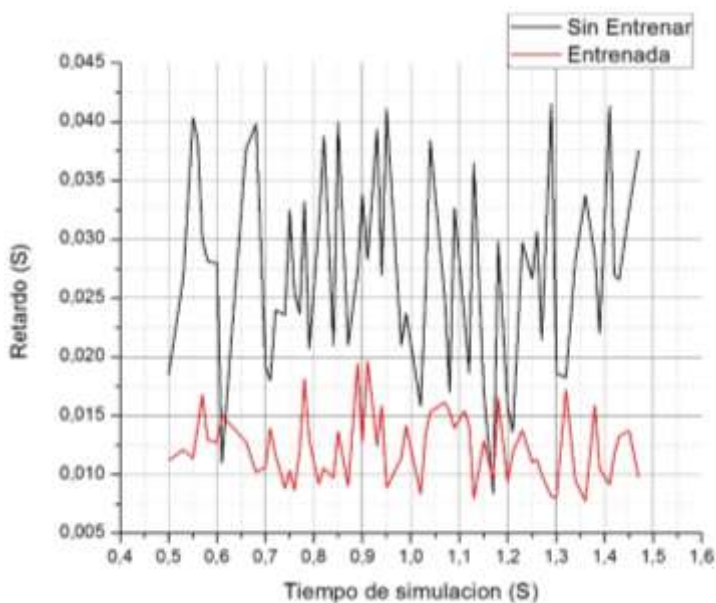


Figura 4. 17 Retardo Extremo a Extremo con tráfico Bajo – lineal

Finalmente, en las Figuras 4. 12, 4. 13, 4. 14, 4. 15, 4. 16, 4. 17 se observa el retardo extremo a extremo que se tiene en la red con respecto al tiempo de simulación (que fue de un segundo). Al igual que en los análisis anteriores, para este caso se tiene que al aplicar el algoritmo HMCNA, disminuyen los retardos extremo a extremo de la red. Esto se debe a que al tener un tamaño adecuado de la ráfaga, el tiempo de ensamble de la misma se reduce, y por tanto el retardo Extremo a Extremo que tienen las ráfagas, disminuyo, el cual viene dado por el tiempo de ensamble más el



tiempo de procesamiento de la ráfaga en cada nodo intermedio más el tiempo que tarda en ir desde el origen hasta el destino. Como se dijo anteriormente, los retardos no tienen una tendencia a seguir, debido a la aleatoriedad de los mismos. De igual manera se puede observar que los retardos que se tienen aumentan a medida que el tráfico aumenta.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las tres simulaciones, se puede observar que el comportamiento de la red implementando el algoritmo HMCNA mejora. Esto se debe a que dicho algoritmo le permite conocer a la red tanto el estado actual como anterior de la misma en cuanto a probabilidades de bloqueo y retardos extremo a extremo, para que analizando esto, se actualice la mejor opción para el ensamble de la ráfaga por medio de la red neuronal específicamente, que es la encargada de decidir el número de paquetes y el tamaño máximo de la ráfaga a ensamblar, mientras que los algoritmos más comunes que se tienen son estáticos, donde el número de paquetes, el tamaño o el tiempo a ensamblar la ráfaga es fijo, lo que no le permite modificar dicho valor de acuerdo a las variaciones de la red en el tiempo y por tanto, tener un desempeño de la red más bajo que cuando se utiliza algún tipo de metaheurística para optimizar algún proceso.

A continuación se muestra una tabla comparativa de los resultados obtenidos en los 3 casos de estudio, para de esta manera, realizar un análisis de las mismas y determinar el caso o casos con mejores respuestas ante la implementación del algoritmo HMCNA.

*Tabla 4. 4 Comparativa de los resultados de simulación*

	Probabilidad de Bloqueo		Retardo Extremo a Extremo	
	Entrenada	Sin Entrenar	Entrenada	Sin entrenar
Tráfico Alto	47%	74%	0,0010s	0,026s
Tráfico Medio	45%	67%	0,011s	0,026
Tráfico Bajo	34%	66%	0,014s	0,03s

En la *Tabla 4. 4* se observa una comparación de la probabilidad de bloqueo y el retardo Extremo a Extremo con respecto a los distintos tipos de tráfico simulados anteriormente (Alto, medio y bajo). Se tiene que a medida que el tráfico aumenta, la probabilidad de bloqueo, de igual manera, aumenta, caso contrario ocurre con el retardo Extremo a Extremo, donde a medida que aumenta el tráfico, el retardo disminuye. Lo anterior se explica, debido a que para tráficos bajos, el tiempo de ensamble de ráfagas es elevado en comparación con tráficos altos y por tanto, el retardo que se obtiene va a ser alto. Por otro lado, la probabilidad de bloqueo tiene un comportamiento inverso al retardo Extremo a Extremo, debido a que al aumentar el tráfico en la red, el número de ráfagas en esta va a aumentar por lo que la probabilidad de que una ráfaga se pierda será mayor.



Por lo anterior, el caso de simulación que presenta mejores resultados es el que se tiene para un tráfico medio, debido a que se tiene un equilibrio entre la probabilidad de bloqueo en la red y el retardo Extremo a Extremo que sufren las ráfagas.





## **CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

En el presente trabajo de grado se expone el diseño, implementación y análisis del algoritmo HMCNA aplicado al proceso de ensamble de ráfagas del modelo de red OBS/DWDM distribuida. Con el objetivo de evaluar el comportamiento de la metaheurística híbrida sobre la red EON OBS/DWDM para el proceso de ensamble de ráfagas, se plantean 3 casos de estudio donde se varía la cantidad de tráfico entrante a la red y las velocidades de los enlaces ópticos. En este capítulo se presentan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros del trabajo de grado *Análisis de desempeño de una red OBS distribuida mediante la integración de un método cognitivo basado en metaheurística híbrida para el ensamble de ráfagas*.

### **5.1 Conclusiones**

En cuanto al diseño, desarrollo e integración del algoritmo que describe un método cognitivo basado en una metaheurística híbrida a la red OBS/DWDM, el cual realiza los procesos de aprendizaje, adaptación y decisión de acuerdo al ciclo cognitivo, se concluye:

- Al realizar el análisis comparativo del desempeño de la red EON OBS/DWDM a nivel de simulación, con y sin la implementación del algoritmo de optimización HMCNA para el ensamble de ráfagas, se obtuvo un mejor desempeño con respecto a la probabilidad de bloqueo y el retardo Extremo a Extremo presentado en la red, siendo este algoritmo una alternativa para mejorar el proceso de ensamble de ráfagas, el cual se adapta al contexto de acuerdo a las condiciones de la red e introduciendo aspectos de cognición en su comportamiento.
- Para realizar el planteamiento del algoritmo fue necesario realizar un estudio en detalle de las metaheurísticas, en donde se identificaron las Redes Neuronales y PSO para construir la metaheurística híbrida dadas sus características idóneas para mejorar el desempeño del proceso de ensamble de ráfagas ya que la primera de estas tiene la capacidad de ser auto organizada, es decir, crea su propia representación de las probabilidades de bloqueo y retardo extremo a extremo para modelarlos y obtener los parámetros óptimos de ensamble. La segunda de estas brinda la posibilidad de buscar un óptimo local de parámetros de ensamble de acuerdo a los estados actuales y anteriores de la red.
- La inclusión de las metaheurísticas en la red EON OBS/DWDM distribuida para el proceso de ensamble de ráfagas le agrega a esta una característica



de cognitividad, debido a que la red se encuentra en constante aprendizaje permitiéndole adaptarse a cambios en su entorno y modificar su comportamiento de acuerdo a los requerimientos y condiciones actuales de la red.

- La velocidad de transmisión del enlace permite obtener un mejor resultado en términos de probabilidad de bloqueo y eficiencia para redes OBS/DWDM, ya que la pérdida de ráfagas que se tiene debido a la distribución de probabilidad de tráfico a la entrada de la red, disminuye por el crecimiento de la velocidad de los enlaces entre los nodos de la misma.
- De acuerdo a los casos analizados en el presente trabajo de grado, se puede concluir que el método de control cognitivo basado en la metaheurística híbrida implementada, presenta en general un mejor comportamiento en términos de probabilidad de bloqueo y retardo extremo a extremo, siendo esta una técnica heurística adecuada y que mejora el proceso de ensamble de ráfagas en una red OBS/DWDM distribuida.
- Para la implementación de las redes neuronales, se vio en la herramienta de simulación Matlab, una gran alternativa debido a que brinda un módulo para la creación de estas redes con un ambiente bastante amigable al usuario, permitiéndole realizar diferentes configuraciones en las que se puede modelar la red de acuerdo a unos requerimientos específicos.
- El uso de la herramienta de simulación IDE OMNeT++ permite realizar diferentes implementaciones de redes de telecomunicaciones, en específico redes ópticas, debido a que al utilizar el lenguaje de programación C++, brinda la posibilidad de codificar y configurar la red de acuerdo a las necesidades del usuario.
- La inclusión del algoritmo HMCNA mejora el desempeño de la red EON OBS/DWDM distribuida, al contrastar los métodos tradicionales empleados para el ensamble de ráfagas que se muestran en los diferentes artículos científicos al respecto

## 5.2 Recomendaciones

La herramienta de simulación OMNeT++ al usar el lenguaje de programación C++, requiere de un conocimiento previo a dicho lenguaje, en un nivel medio o avanzado para poder desarrollar y simular distintos tipos de redes. Pero, a pesar de esto, se debe estar familiarizado con la sintaxis que esta maneja, puesto que utiliza ciertos comandos propios del simulador.

Se recomienda tener especial cuidado con los tamaños de vectores utilizados en la herramienta. Esto debido a que al momento de hacer las diferentes conexiones



entre nodos, es de vital importancia que dichos vectores concuerden en tamaño, de lo contrario, la conexión no podrá hacerse efectiva.

OMNeT++ es una herramienta robusta que permite la implementación y verificación de modelos propios de red, por tanto requiere de un computador de alto rendimiento para su utilización. De acuerdo con las diferentes pruebas realizadas en los computadores, se recomienda utilizar un procesador como mínimo core i5 o su correspondiente equivalente y con una Ram de 8Gb para el correcto funcionamiento de la herramienta. De igual manera, se recomienda utilizar el sistema operativo Linux puesto que se obtuvo un mejor desempeño sobre este.

Para una obtención más eficiente de los datos necesarios, se recomienda utilizar señales en la simulación que permitan posteriormente ser emitidas y guardadas en el archivo .vec que genera el sistema después de cada simulación. Esto debido a que puede llegar a ser tedioso la obtención de los datos por medio de la consola, ya que se debe observar y copiar los datos necesarios de acuerdo a los eventos generados en el tiempo de simulación.

### **5.3 Trabajos Futuros**

La implementación de un método cognitivo basado en una metaheurística híbrida para el ensamble de ráfagas y los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado se presentan como referencia para futuros trabajos de grado que desarrollen análisis adicionales en el marco de las redes ópticas con Conmutación óptica de ráfagas. Por esto se propone los siguientes trabajos futuros:

- Diseñar e implementar un algoritmo que permita analizar el desempeño de una red OBS distribuida al implementar una metaheurística para procesos de ensamble y enrutamiento de las ráfagas.
- Evaluar el desempeño de una red OBS al implementar el mecanismo de segmentación por ráfagas.
- Evaluar el desempeño de la red OBS al integrar un método cognitivo para mecanismos de planificación y mecanismos de resolución de contienda.
- Evaluar la incidencia que tiene la implementación de técnicas de QoS para redes OBS y analizar el comportamiento de la red.



## Referencias

- [1] G. Puerto Leguizamón, B. Ortega, J. Capmany, K. Cardona Urrego, and C. Suárez Fajardo, "Evolución de las redes de datos: Hacia una plataforma de comunicaciones completamente óptica," *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, no. 45, pp. 148–156, 2008.
- [2] J. Velasco, "FTTH, hogares con mucha fibra," 2013. [Online]. Available: <http://blogthinkbig.com/ftth-fiber-to-the-home/>. [Accessed: 23-May-2015].
- [3] M. Duser, I. de Miguel, and D. Wishik, "Timescale analysis for wavelength-routed optical burst-switched (WR-OBS) networks," *Opt. Fiber Commun. Conf. Exhib.*, vol. pp.222,224, no. 10.1109/OFC.2002.1036320, 2002.
- [4] R. J. Millan Tejedor, "IP sobre WDM," *Comun. World*, no. 174, pp. 52–54, 2003.
- [5] C. Qiao and M. Yoo, "Optical Burst Switching (OBS) - A New Paradigm for an Optical Internet," *J. High Speed Networks*, vol. 8, no. 716, pp. 69–84, 1999.
- [6] Jason P Jue and Vinod M. Vokkarane, *Optical Burst Switched Networks*. .
- [7] J. G. Lopez Perafan, "Diseño de metodos Cross Layer cognitivos para redes de conmutacion optica de rafagas (OBS)," Universidad del Cauca, 2015.
- [8] A. B. Rodríguez and F. Saavedra, "Optimización del algoritmo genético para la solución integral de enrutamiento en redes fotónicas," *Inf. Tecnol.*, vol. 21, no. 3, pp. 125–133, 2010.
- [9] R. S. Barpanda, A. K. Turuk, B. Sahoo, and B. Majhi, "A genetic algorithm way of solving RWA problem in all optical WDM networks," in *Communications in Computer and Information Science*, vol. 125 CCIS, National Institute of Technology Rourkela Orissa India, 2011, pp. 137–142.
- [10] C. Salto, "Metaheurística híbridas paralelas para problemas industriales de corte, empaquetado y otros relacionados," Universidad Nacional de San Luis, 2009.
- [11] Á. García Sánchez, "Técnicas metaheurísticas," Madrid.
- [12] J. B. Santana, C. C. Rodríguez, F. C. García López, M. García Torres, B. M. Batista, J. a. Moreno Pérez, and J. M. Moreno Vega, "Metaheurísticas: Una revisión actualizada.," Universidad de La Laguna, 2004.
- [13] C. Blum, J. Puchinger, G. R. Raidl, and A. Roli, "A brief survey on hybrid metaheuristics," *Bioinspired Optim. Methods their Appl. - Proc. 4th Int. Conf. Bioinspired Optim. Methods their Appl. BIOMA 2010*, pp. 3–16, 2010.
- [14] M. C. Sinclair, "Minimum cost topology optimisation of the COST239 European Optical Network," University of Essex.
- [15] M. . O'Mahony, "Results from the COST 239 project. Ultra-High Capacity Optical Transmission Networks," 1996, pp. 11–18 vol 2.
- [16] I. Society, "History of Internet." [Online]. Available: <http://www.internetsociety.org/history>.
- [17] L. C. G. Hinojosa, "Temas Selectos de Fibra Optica," p. 238, 2007.
- [18] J. L. C. Palma, "Estudio para la integracion de la tecnica de multiplexacion DWDM(Dense Wavelength Division Multiplexing) dentro de un enlace Quito-Guayaquil que utilice SDH como tecnica de transmision para una mediana empresa portadora," 2009.



- [19] M. Y. M. Yoo and C. Q. C. Qiao, "Just-Enough-Time (JET): a high speed protocol for bursty traffic in optical networks," *1997 Dig. IEEE/LEOS Summer Top. Meet. Vertical-Cavity Lasers/Technologies a Glob. Inf. Infrastructure/WDM Components Technol. Semicond. Lasers Appl.*, vol. 3, pp. 3–4, 1997.
- [20] M. Maier, *Optical Switching Networks*. Cambridge University Press, 2008.
- [21] G. Jaramillo Andrade, "Estudio de la Tecnología de Conmutación Óptica por Ráfagas - OBS y Análisis de Migración de Redes Ópticas Pasivas a esta tecnología," 2011.
- [22] M. Itoiz Etxarri and J. M. Algueta, "Optical Burst Switching (OBS): Conmutación óptica de ráfagas," pp. 1–4.
- [23] A. Lopez Lucia, "Cuaderno Red de Cátedras Telefónica Comunicaciones basadas en conmutación óptica de paquetes," 2011.
- [24] G. N. Rouskas and L. Xu, "OPTICAL PACKET SWITCHING," North Carolina State University.
- [25] E. F. Ibarra Bermudez and H. A. Enriquez Muñoz, "Análisis del desempeño de la Red OBS COST239 mediante SWARM INTELLIGENCE aplicando el algoritmo ACO para resolver el problema RWA," Universidad del Cauca, 2015.
- [26] V. D. F. Informatik and E. Informationstechnik, "Quality of Service Guarantee in the Edge Node of Optical Packet / Burst Switched Networks with Traffic Assembly," 2009.
- [27] C. Qiao and M. Yoo, "Choices, Features and Issues in Optical Burst Switching," pp. 1–18, 1999.
- [28] J. S. Turner, "Terabit burst switching," *J. High Speed Networks*, vol. 8, no. 1, pp. 3–16, 1999.
- [29] K. Dolzer and C. Gauger, "On Burst Assembly in Optical Burst Switching Networks – A Performance Evaluation of Just-Enough-Time OPTICAL BURST SWITCHING (OBS)," no. 01, pp. 1–12, 2001.
- [30] V. Vokkarane, K. Haridoss, and J. P. Jue, "Threshold-based burst assembly policies for QoS support in optical burst-switched networks," *Proc. SPIE/IEEE Opt.*, pp. 125–136, 2002.
- [31] X. C. X. Cao, J. L. J. Li, Y. C. Y. Chen, and C. Q. C. Qiao, "Assembling TCP/IP packets in optical burst switched networks," *Glob. Telecommun. Conf. 2002. GLOBECOM '02. IEEE*, vol. 3, 2002.
- [32] I. Cerijo Graña, "Simulación y comparativa de mecanismos de conmutación en redes ópticas," Universidad de Vigo, 2005.
- [33] D. A. Flores Cardenas, "Estudio y simulación de la tecnología de conmutación óptica por ráfagas," Escuela Politécnica Nacional, 2010.
- [34] O. Pedrola, M. Klinkowski, D. Careglio, J. Solé-Pareta, S. Rumley, and C. Gaumier, "JAVOBS: A flexible simulator for OBS network architectures," *J. Networks*, vol. 5, no. 2, pp. 256–264, 2010.
- [35] Y. Chen, C. Qiao, X. Yu, and C. Science, "Optical Burst Switching (OBS): A New Area in Optical Networking," pp. 1–13.
- [36] B. Morey Pascual and M. Naharro Parra, "Estudio e implementación de mecanismos de asignación de longitudes de onda para redes OBS sin colisiones," Escola Politècnica Superior de Castelldefels, 2009.
- [37] D. Gavalas, "Virtual topology and wavelength assignment using linear programming,"





- University of Essex, 1997.
- [38] “Dimensionnement de réseaux optiques.” [Online]. Available: <http://www-sop.inria.fr/mascotte/porto/>.
- [39] I. T. Monroy, D. Zibar, N. G. Gonzalez, and R. Borkowski, “Cognitive heterogeneous reconfigurable optical networks (CHRON): Enabling technologies and techniques,” *Int. Conf. Transparent Opt. Networks*, pp. 2–5, 2011.
- [40] J. Mitola, “Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio,” Royal Institute of Technology (KTH), 2000.
- [41] T. R. Tronco, C. Amilcar C., and M. de I. Rocha, “Cognitive Optical Networks Architectures,” SP- Brazil.
- [42] P. Rousu, “Cognitive Networks,” University of Helsinki, 2006.
- [43] R. M. Lorenzo, “Cognitive techniques find its way into the Optical Networks,” *October*. [Online]. Available: [http://cordis.europa.eu/fp7/ict/future-networks/documents/projects-chron\\_en.pdf](http://cordis.europa.eu/fp7/ict/future-networks/documents/projects-chron_en.pdf). [Accessed: 23-Jul-2014].
- [44] C. Jansse, “Cognitive Network (CN).” [Online]. Available: <http://www.techopedia.com/definition/28449/cognitive-network-cn>. [Accessed: 23-Jul-2015].
- [45] D. D. Clark, C. Partridge, J. C. Ramming, and J. T. Wroclawski, “A knowledge plane for the internet,” *Proc. 2003 Conf. Appl. Technol. Archit. Protoc. Comput. Commun. - SIGCOMM '03*, p. 3, 2003.
- [46] G. S. Zervas and D. Simeonidou, “Cognitive optical networks: Need, requirements and architecture,” *2010 12th Int. Conf. Transparent Opt. Networks, Ict. 2010*, no. July 2010, pp. 1–5, 2010.
- [47] S. H. Bullard and W. D. Klemperer, “A case for heuristic optimization methods in forestry,” Mississippi State University, 1984.
- [48] M. Gomez González, “Sistema de generación eléctrica con pila de combustible de óxido sólido alimentado con residuos forestales y su optimización mediante algoritmos basados en nubes de partículas,” Universidad Nacional de Educación a distancia, 2008.
- [49] F. Luna Valero, “Metaheurísticas avanzadas para problemas reales en redes de telecomunicaciones,” Universidad de Málaga, 2008.
- [50] P. T. Rodríguez-Piñero, “Introducción a los algoritmos genéticos y sus aplicaciones,” pp. 1–9.
- [51] N. Azlina, A. Aziz, A. W. Mohemmed, and M. Zhang, *Particle Swarm Optimization*, vol. 6, no. 17. Vienna Austria: In-Tech, 2010.
- [52] B. Martin del Brío and A. Sanz Molina, *Redes Neuronales y Sistemas Borrosos*, 3<sup>a</sup> Edición. México D.F, 2007.
- [53] G. Julian, “Las redes neuronales: qué son y porque estan volviendo,” 2014. [Online]. Available: <http://www.xataka.com/robotica-e-ia/las-redes-neuronales-que-son-y-porque-estan-volviendo>. [Accessed: 25-Aug-2015].
- [54] O. Pedrola Escribà, “Implementation and Validation of JAVOBS : a Flexible Simulator for OBS Network Architectures,” École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Universitata Politècnica de Catalunya, 2008.
- [55] A. M. Hincapie Mocayo and T. Peña Valneca, “Análisis de desempeño del RWA en



redes OBSWDM con control cognitivo basado en algoritmos genéticos,” Universidad del Cauca, 2013.

- [56] M. Morales, M. A. Calle, J. D. Tovar V., and J. C. Cuéllar Q., *Simulando con OMNET, Selección de la herrameinta y utilización*. Cali, Colombia, 2013.
- [57] F. Espina, J. Armendariz, M. Izal, D. Morató, and E. Magaña, “Arquitectura y diseño de un modelo de red OBS para simulación,” Universidad Pública de Navarra.
- [58] R. García Pedraza, *Introducción a la Probabilidad imposible, estadística de la probabilidad o probabilidad estadística*. 2015.
- [59] A. Palmer Pol and J. J. Montañó Moreno, “¿ Qué son las redes neuronales artificiales? Aplicaciones realizadas en el ámbito de las adiciones,” *Adicciones*, vol. 11, no. 3, pp. 243–256, 1999.
- [60] T. D. Sanger, “Optimal unsupervised learning in a single-layer linear feedforward neural network,” *Neural Networks*, vol. 2, no. 6, pp. 459–473, 1989.
- [61] J. Trujillano Cebello, M. Badía Catello, J. March Llanes, Á. Rodríguez Pozo, L. Serviá Goixart, and A. Sorribas Tello, “Redes neuronales artificiales en Medicina Intensiva. Ejemplo de aplicación con las variables del MPM II,” Universidad de Lleida, 2005.
- [62] MathWorks, “Matlab- El Lenguaje del Cálculo Técnico.” [Online]. Available: [xhttp://es.mathworks.com/products/matlab/index.html](http://es.mathworks.com/products/matlab/index.html). [Accessed: 01-Oct-2015].
- [63] M. H. B. M. T. H. H. B. Demuth, “Neural Network Toolbox User ’ s Guide How to Contact MathWorks,” in *MathWorks*, 2015.
- [64] R. Hecht-Nielsen, *Neurocomputing*, Addison We. 1990.
- [65] M. Nakamura, R. Mines, and V. Kreinovich, “Guaranteed Intervals for Kolmogorov ’ s Theorem ( and Their Possible Relation to Neural Networks ),” *Mater. Res.*, no. 9, pp. 1–13, 1994.