JOSE GIOVANNY LÓPEZ PERAFÁN

DISEÑO DE MÉTODOS *CROSS LAYER* COGNITIVOS PARA REDES DE COMUNICACIÓN ÓPTICA DE RÁFAGAS (OBS)

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones de la
Universidad del Cauca para la obtención del
Título de
Doctor en:
Ciencias de la Electrónica

Directores:
Ramón J. Durán B. Ph.D.
Pablo Emilio Jojoa Gómez Ph.D.

2014

Aceptación

Dedicatoria

A la memoria de mi señora Madre Inés Perafán, tres (3) años sin tu dulce presencia.

A Sandra, Daniel y David.

Agradecimientos

Expreso mis agradecimientos primeramente a Dios fuente de todo lo que existe, a mi familia: Sandra, Daniel y David, su paciencia ha sido enorme. Agradezco a la Universidad del Cauca, son más de dos décadas con ustedes, agradezco a Pablo Jojoa mi tutor y colega, a la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones y al departamento de Telecomunicaciones.

Igualmente, agradezco al ETSI en la Universidad de Valladolid en Castilla y León (España) y al grupo de Comunicaciones Ópticas GCO, por su recibimiento y trato, al Dr. Ramón J. Durán sus orientaciones fueron muy importantes para definir el rumbo a seguir, al Dr. Rubén M. Lorenzo director de la escuela de Telecomunicaciones de la Universidad de Valladolid muchas gracias por su amistad y colaboración para la realización de la pasantía.

A todas las personas que de alguna manera tuvieron que ver con este trabajo, muchas gracias!

Resumen estructurado

Las redes por Conmutación Óptica de Ráfagas OBS (*Optical Burst Switching*) al igual que su variante centralizada WROBS (*Wavelength Routed OBS*) son tecnologías de amplia difusión en los entornos de investigación especialmente en Europa, Asia y Estados Unidos. Sin embargo, en el caso Colombia, el nicho de investigación en el área de las redes por comunicación óptica con enfoque cognitivo es aún incipiente. Este aspecto se puede mejorar considerablemente dando impulso al desarrollo de estudios y proyectos de investigación en esta área. Igualmente, teniendo en cuenta la creciente importancia que están adquiriendo las tecnologías ópticas y en especial OBS, considerada como una de las alternativas con mejores perspectivas para convertirse en el soporte de Internet (y posiblemente como red de núcleo para la denominada Internet de las cosas), se propone a las diferentes instancias de investigación y de docencia al interior de la Universidad del Cauca y en especial a la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, una forma de apropiar este concepto e involucrarlo en sus procesos de investigación, desarrollo y docencia. Una opción para alcanzar este logro es a través del desarrollo de proyectos de Tesis y proyectos de investigación que vinculen puntualmente este tipo de tecnologías, para ello se puede aprovechar la naciente línea de investigación en **comunicaciones ópticas**, considerada como "línea prioritaria" al interior del grupo de I+D en Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones o GNTT.

Como resultado de los esfuerzos realizados hasta el momento para la apropiación de ésta tecnología de comunicaciones ópticas se presenta el desarrollo de la Tesis Doctoral titulada "Diseño de métodos *Cross Layer* cognitivos para redes por conmutación óptica de ráfagas OBS" la cual se enfoca principalmente hacia la construcción de redes de comunicaciones ópticas cognitivas mediante la combinación de diferentes conceptos entre ellos: arquitectura de redes ópticas,

funcionalidad y operación de las redes por conmutación óptica de circuitos, paquetes y especialmente de ráfagas, granularidad en OBS, cognición, plano de conocimiento, arquitecturas cognitivas, meta heurísticas, inteligencia artificial, protocolos de transporte, redes IP y diseño orientado a *Cross Layer*.

Se busca entonces, que el desarrollo de esta Tesis se constituya en un aporte válido para ayudar en la consolidación de la línea de investigación antes mencionada, éste esfuerzo ha implicado en principio la realización de un estudio en detalle de cada temática en aras de obtener una base conceptual sólida. Para lograrlo se ha examinado una amplia literatura sobre redes OBS y sobre aspectos funcionales del protocolo TCP (*Transmission Control Protocol*) siendo este protocolo el que en la actualidad controla la mayor cantidad de tráfico que circula por Internet. Estos conceptos en conjunto con las otras tecnologías y los temas mencionados en el párrafo anterior permiten responder a diferentes preguntas e hipótesis planteadas alrededor de la temática.

Al enfocarse sobre las redes OBS la intención investigativa se sitúa en el análisis del desempeño de esta clase de redes al incluir meta heurísticas y cognición en algunas de sus funcionalidades. Procesos funcionales en OBS como enrutamiento y asignación de longitudes de onda o RWA (*Routing and Wavelength Assignment*), ensamble de ráfagas y control de contención, pueden ser analizados para observar su comportamiento al incluir mecanismos o métodos de control cognitivo. De esta forma es posible mediante el empleo de diferentes métricas, analizar el desempeño de la red OBS con y sin mecanismos de control cognitivo y su interacción con los protocolos TCP/IP.

Para abordar el desarrollo de esta Tesis fue necesario conocer y entender una serie de aspectos relacionados con el concepto de cognición. Para lograrlo se debió analizar diferentes propuestas sobre cognición en el ámbito de la sicologá cognitiva en humanos y distintos modelos de arquitecturas cognitivas, las cuales se enfocan principalmente a redes inalámbricas, este último aspecto conduce a realizar la propuesta de una arquitectura de red cognitiva denominada ARCO la cual en principio, es aplicable a cualquier red de comunicaciones y en particular a redes OBS cuando se requiera de un comportamiento de tipo cognitivo. Igualmente, al no contar con un diseño orientado a *Cross Layer* para el escenario de interacción entre capas

OBS y entre OBS y TCP, se diseña y propone un modelo *Cross Layer* que no altera el modelo tradicional en capas de las redes OBS y TCP/IP. Finalmente, sumado a lo anterior se propone un modelo tentativo para QoS (*Quality of Service*) sobre redes OBS.

Tomando elementos funcionales de estas propuestas se procede gradualmente al diseño y prueba mediante simulación de distintos modelos de red OBS. Para el proceso de diseño de los modelos de red OBS se adaptan algunas fases de la metodología para el diseño de redes tipo *top-down*, igualmente se adapta una metodología de simulación la cual se orienta a definir inicialmente un “modelo de desempeño o comportamiento” y posteriormente un “modelo de simulación” sobre éste ultimo se opera funcionalmente mediante el empleo de la IDE de simulación OMNeT++.

Entonces, con la ayuda de la herramienta OMNeT++ basada en C++, se construyen los simuladores de red OBS comenzando por diseñar y probar módulos y sub módulos de OBS individualmente, luego se integran en un módulo mayor hasta que se construye el prototipo de red de prueba los cuales se conciben inicialmente sin ningún mecanismo de control cognitivo que facilite una operación de la red bajo condiciones de variación de tráfico de entrada y en tiempo de simulación (estado estacionario). Vale anotar que la red adoptada en un principio corresponde a una red con topología regular de cuatro nodos conectada completamente, después se utiliza la topología de la red NSFNeT, una red con topología irregular la cual se encuentra incluida en numerosos estudios e investigaciones alrededor del mundo, igualmente es posible realizar pruebas con las topologías GEANT2 y EON que pueden tener un mayor o menor número de nodos y que son de amplio conocimiento especialmente en Europa.

Una vez se cuenta con las redes OBS debidamente ajustadas, se examina su desempeño sin incluir meta heursiticas o métodos cognitivos, en seguida se propone una forma de resolver RWA con meta heurísticas basadas en población (por ejemplo Algoritmos Genéticos AG) las cuales se incluyen en las redes OBS. Posteriormente se realiza de nuevo el análisis de la red OBS con meta heurísticas más Cognición, asimismo, se propone en empleo de métodos cognitivos en los procesos de ensamble de ráfagas llevados a cabo en los nodos de borde, seguidamente se

analizan los parámetros de desempeño tomados desde la definición de QoS, se trata de los parametros que permiten medir la probabilidad de bloqueo o pérdida de ráfagas y los retardos extremo a extremo D (*end to end delay*), estos se pueden medir en tiempo de simulación y en presencia de carga normalizada.

Adicional a lo anterior, se propone el diseño de un *Cross Layer* con mecanismos cognitivos que permita la interacción entre la red OBS y la pila de protocolos TCP/IP, además de observar la interacción entre estos modelos de red (TCP/IP y OBS) se revisa como se puede mejorar la prestación de servicios orientados a conexión desde TCP y el despliegue de sus mecanismos de control de flujo y control de congestión.

Finalmente, se incluyen algunas pruebas con otras heurísticas como PSO (*Particle Swarm Optimization*) y ACO (*Ant Colony Optimization*), además de algunas mejoras en la elección de las poblaciones iniciales, buscando que no sea una población aleatoria. Es importante resaltar que los resultados obtenidos en las pruebas sobre redes OBS muestran en general una mejoría en cuanto a la probabilidad de bloqueo en los diferentes escenarios al incluir meta heurísticas y cognición. Lo anterior justifica continuar con la investigación de redes OBS cognitivas, para lo cual en el Capitulo 5 se proponen diferentes alternativas de investigación y desarrollo.

En resumen, con el desarrollo de la presente Tesis, se obtiene un modelo de arquitetura cognitiva (ARCO), un modelo orientado a *Cross Layer* y un modelo de red OBS con y sin la inclusión de métodos cognitivos. Asimismo, se propone la utilización de una metodología de simulación al igual que una metodología para el diseño de redes tipo *Top Down* la cual sirve de guía para obtener los modelos lógicos y físicos de las redes OBS. Teniendo en cuenta que en la propuesta inicial de la red OBS se considera un nivel físico ideal (sin incluir los efectos lineales y no lineales sobre el enlace óptico), para no dejar al margen este aspecto en la presente investigación se diseña y prueba por separado una propuesta de enlace DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) a nivel de simulación entre dos ciudades (por ejemplo tomando dos (2) nodos de la red OBS NSFNeT) lo cual se lleva a cabo en herramienta de simulación Optsim™. Cada uno de los modelos obenidos al igual que los diferentes escenarios de simulación desarrollados entre ellos el diseño orientado a *Cross Layer*

cognitivo se han basado en teorías vigentes al respecto y cada uno cuenta con el aporte del autor en cada detalle.

Finalmente, se anota que el documento elaborado para esta Tesis compuesto por cinco (5) capítulos contiene primeramente las bases teóricas necesarias, los diseños propuestos, los escenarios de simulación desarrollado y los diferentes resultados obtenidos, igualmente, en el Capítulo 5 además de incluir una serie de conclusiones sobre el trabajo desarrollado, se define y propone una serie de retos de investigación sobre las temáticas tratadas en la Tesis, teniendo como uno de sus objetivos centrales la consolidación de la línea de investigación en comunicaciones ópticas.

Palabras Claves: Conmutación óptica de ráfagas OBS, meta heurísticas, arquitectura cognitiva, *Cross Layer*.

Structured Abstract

Optical Burst Switched Networks (OBS) as well as its centralized variant WROBS are technologies widely available in research settings, especially in Europe, Asia and the United States. However, in the case of Colombia, its presence is still emerging as a research niche in the area of optical communication networks, aspect that expected to be improve driving the development of studies and researches in this knowledge area. Also, taking into account the growing importance acquired by the optical technologies and especially OBS considered one of the alternatives with better prospects to become an Internet support (and possibly the core of the network called the Internet of things IoT), it is proposed to the different authorities in research and teaching within the University of Cauca and especially in the Faculty of Electronic and Telecommunications Engineering to find a way to appropriate this concept and involve it in their research, development and teaching processes. One way to achieve this goal is by means of the support to the emerging line of research in optical communications considered "priority line" within the group of R & D in New Technologies in Telecommunications or GNTT by developing thesis and research projects that bind this kind of technologies together.

Result of the efforts made so far to the appropiation of the area in optical communications technology is the development of this doctoral thesis entitled "Design of Cross Layer cognitive methods for optical burst switching networks" which has a central approach to the construction of cognitive optical communications networks by combining different concepts, including: optical network architecture, functionality and operation of the networks by optical circuit, packet and especially burst switching, elements of OBS granularity, cognition, knowledge plane, cognitive architectures, meta heuristics, artificial intelligence, transport protocols, IP networks and Cross Layer design mainly.

The development of this Thesis will constitute a valid contribution within the consolidation of the aformentioned research line which has involved a detailed study of each subject in order to obtain a solid conceptual base. Added to this, behavioral

aspects of TCP (Transmission Control Protocol) are included. There are many reasons for this choice, since being the protocol that currently controls the largest amount of Internet traffic passing through its compatibility with the goal of achieving that the OBS networks constitute the ideal support for the Internet services and its world wide disemination.

OBS and TCP concepts in conjunction with other technologies and issues mentioned above in this research, allow whole answer different questions and hypotheses about the subject.

By focusing on OBS networks, the research intention is to analyze the performance of such networks. Some of their functionalities such as routing and wavelength assignment (RWA), burst assembly processes and contention control mechanisms, can be analyzed to observe their behavior when including cognitive control methods. This is possible using different metrics to analyze the performance of the OBS network with and without cognitive control methods.

To address this development was first necessary to have elements involving cognition. After analyzing different proposals on cognition, cognitive architectures which focus primarily on wireless networks, in this thesis cognitive network architecture applicable to general communications networks is proposed, and in particular the OBS networks. Secondly, because there is not a Cross Layer model for the scenario of interaction between OBS layers and between OBS and TCP, it is designed and proposed Cross Layer model that in principle does not alter the layered model of OBS networks and TCP/IP protocol suite. In third option a tentative model for QoS over OBS networks is proposed. After taking elements of these proposals the design and testing of different models of OBS networks can be developed gradually by the simulation methods, during the design process of OBS network models some phases of the top-down network design methodology are adjusted, equally a simulation methodology which seeks to characterize a "performance model" and then a "simulation model" on which the tool or simulation environment OMNeT++ can be worked. The reasons for having chosen OMNeT++ IDE are explained in the Thesis document.

So with the help of OMNeT++ tool based on C++ on the Eclipse system, OBS simulators are constructed: it begins by designing and testing modules and sub modules OBS individually, then they are integrated into a larger module until it is built the desired network prototype test which was initially conceived without cognitive control mechanism that facilitates an operation thereof under conditions of input traffic variation and in simulation time (steady state). It is worthy to high light that the network initially adopted corresponds to a regular network topology with four fully

connected nodes, then the topology of the NSFNeT is used, this is a network with irregular topology which is included in numerous studies and research around the world. Also it is possible to test the EON and GEANT2 topologies which can have higher or lower number of nodes, which are widely known, especially in Europe.

Once networks are properly adjusted, their performance is examined and then a way to solve RWA with metaheuristics based on population (i.e. genetic algorithms GA) and then GA with Cognition seemingly the use of cognitive methods is proposed in the burst assembly processes in edge nodes, then the performance parameters taken from the definition of QoS such as burst loss probability BLP, blocking probability and end-to-end delays are analyzed, these elements can be measure in simulation time and it is possible to measure then in presence of normalized traffic load. In addition to the above, the design of a Cross Layer is proposed with cognitive mechanisms that allow interaction between the OBS network and the TCP/IP protocol stack, besides observing the interaction between these models network (TCP/IP and OBS) it is reviewed how it can be improved connection-oriented services delivery from TCP and the use of the mechanisms mentioned for flow control and congestion control.

Some tests with other heuristics as PSO and ACO further are included, in addition to some improvements in the choice of the initial population, looking for the population not to be chosen at random but means of an artificial neural network ANN. The results show a general improvement in the blocking probability in different scenarios when including metaheuristics and cognition.

In summary, with the development of this Thesis, a model of cognitive OBS network is obtained, that allows to analyze by using the OMNeT++ simulation tool, the interaction process between a TCP / IP network environment and OBS sub network using a Cross Layer with vertically calibration and including knowledge bases (KB) as a central element in the proposed cognitive methods. It is remarkable the fact that at the time of the designs of both the OBS network without GA; with and without cognition; it is proposed to use a network design methodology type Top Down that provides guidance to obtain logical and physical models for OBS networks. Similarly, as in the original proposal of the OBS network is considered an ideal physical layer (regardless of the linear and nonlinear effects on the optical link), in this research a proposed DWDM link designed and tested separately to a simulation level between two cities (i.e. between two (2) nodes of the NSFNeT OBS network) using OptSim™ simulation tool. Each of the so-called simulation scenarios, and cognitive Cross Layer are based on current theories about it, with the contribution of the author in every detail of the design.

Finally, it is noted that the document prepared for this Thesis consists of five (5) chapters that contain the theoretical bases, the proposed design, simulation scenarios and results obtained. Therefore, in Chapter 5 are defined and proposed some research challenges on the subject, having as main goal to achieve the consolidation of the research line on optical communications.

Keywords*: Optical Burst Switching OBS, metaheuristics, Cognitive Architectures, Cross Layer design*.

Contenido

Introducción General
Capítulo 1 1
Las Redes Ópticas 1
1.1. Introducción – Los sistemas de transporte ópticos 1
1.2. Aspectos básicos de las redes ópticas 5
1.3. Evolución de las redes WDM 12
1.4. Arquitecturas por Conmutación Óptica 18
1.4.1. Principio de Operación 19
1.4.2. Conmutación Óptica de Circuitos OCS (*Optical Circuit Switching*) 20
1.4.3. Conmutación Óptica de Paquetes OPS (*Optical Packet Switching*) 24
1.4.4. Conmutación Óptica de Ráfagas OBS (*Optical Burst Switching*) 29
1.4.5. Comparación OCS, OBS y OPS 64
1.4.6. Retos en investigación 77
1.5. Conclusiones del Capítulo 79
Capítulo 2 83
Redes OBS 83
2.1. Introducción 83
2.2. Por qué OBS y qué es OBS? 85
2.3. Fundamentos de la Conmutación de ráfagas 90
2.3.1. Generalidades 90
2.3.2. Características de las Ráfagas 95
2.3.3. Métodos de Construcción o formación de ráfagas 100
2.3.4. Proceso de ensamble de ráfagas 103
2.4. Algoritmos de Ensamble de ráfagas 105
2.4.1. Esquema basado en el tiempo T 106

2.4.2. Esquema basado en longitud de ráfaga B 106
2.4.3. Algoritmo mixto o híbrido 108
2.4.4. Algoritmos Adaptativos 110
2.4.5. Consideraciones de tiempo y longitud 111
2.5. Algoritmos de Señalización 124
2.5.1. El protocolo JET y Sus variantes 125
2.5.2. El empleo del tiempo *offset* 126
2.5.3. DR (*Delayed Reservation*) para uso eficiente del ancho de banda 127
2.5.4. Gestión Inteligente de *Buffer* 129
2.5.5. Encaminamiento adaptativo y esquemas de prioridad 129
2.5.6. Ejemplo de evaluación del desempeño de JET 131
2.6. Calidad de servicio en redes OBS 137
2.6.1. Ambientación 137
2.6.2. QoS relativa en redes OBS 139
2.6.3. QoS en la asignación del tiempo *offset* 139
2.6.4. QoS mediante resolución de contención priorizada 140
2.6.5. QoS proporcional con eliminación temprana (*early dropping*) 142
2.6.6. QoS mediante Colas priorizadas 143
2.6.7. QoS basado en reserva 143
2.6.8. QoS con base en mecanismos de ensamble de ráfagas 143
2.6.9. QoS en redes WROBS (*Wavelength Routed OBS*) 147
2.6.10. QoS Absoluta 149
2.7. Encaminamiento en redes OBS 150
2.7.1. Encaminamiento de fuente 151
2.7.2. Encaminamiento salto a salto 152
2.7.3. Encaminamiento centralizado 152
2.7.4. Pre-cómputo de rutas 153
2.7.5. Encaminamiento estático vs dinámico 153
2.7.6. Importancia del encaminamiento 154
2.7.7. Algoritmos de Encaminamiento 154
2.8. Resolución de Contención 159
2.9. Mecanismos de recuperación de ráfagas perdidas 159
2.10. Desarrollos OBS e implementación de *testbeds* 161
2.11. Arquitectura de red OBS 162
2.11.1. Modelo funcional de red OBS 163

2.11.2. Nodo de Borde (*Edge Node*) 165
2.11.3. Nodo Central (*Core Node*) 175
2.12. Ejemplos de aplicación 177
2.12.1. Impacto de los parámetros de ensamble de ráfagas en la latencia en una red OBS 177
2.12.2. Elementos de evaluación de desempeño para redes OBS 181
2.13. Variantes de OBS 187
2.13.1. LOBS (*Labelled OBS*) 187
2.13.2. WROBS (*Wavelength Routed* OBS) 188
2.13.3. TCP sobre OBS 189
2.14. Conclusiones del Capítulo 192
Capítulo 3 195
Cognición, Redes Cognitivas y *Cross Layer* 195
3.1. Introducción 195
3.2. Cognición 200
3.2.1. Conceptualización Preliminar 200
3.2.2. Relación entre Calidad de Servicio y Cognición 203
3.2.3. Fundamentos de las Redes Cognitivas 206
3.2.4. Elementos básicos de una Red Cognitiva 221
3.2.5. Proyectos e Iniciativas sobre redes y arquitecturas cognitivas 224
3.2.6. Lenguajes de Especificación y Descripción Cognitivos 245
3.2.7. Técnicas de Aprendizaje de Máquina 247
3.2.8. Aprendizaje de Máquina en Redes Cognitivas 247
3.2.9. Como entender una infraestructura Cognitiva 256
3.3. Conceptualización *Cross Layer - CL* 258
3.3.1. Introducción 258
3.3.2. Por qué un diseño *Cross Layer*? 261
3.3.3. Taxonomía de Cross Layer 262
3.3.4. Interacción entre niveles y entes en un *Cross Layer* 266
3.3.5. Retos futuros para diseños orientados a *Cross Layer* 268
3.3.6. Intercambio de Información en modelos *Cross Layer* 270
3.4. Desarrollo de las propuestas 272
3.4.1. Propuesta de una Arquitectura para QoS 273
3.4.2. Propuesta de una Arquitectura Cognitiva 296
3.4.3. Propuesta de diseño de un CL- *Cross Layer* (Modelo de Integración) 313

3.5. Conclusiones del Capítulo 337
Capítulo 4 339
Diseño de Escenarios y Modelos de desempeño y Simulación 339
4.1. Introducción 339
4.2. Elaboración de los Modelos de Desempeño y Simulación 342
4.2.1. Ambientación Inicial 342
4.2.2. Desarrollo de la metodología propuesta 343
4.2.3. Diseño de la red Inicial (de Partida) 352
4.2.4. Desarrollo de la metodología para el diseño de redes 355
4.3. Diseño de meta heurísticas para OBS 376
4.3.1. Selección de las Meta heurísticas a emplear 377
4.3.2. Empleo de GA (*Genetic Algorithms*) en RWA 379
4.3.3. Empleo de ACO (*Ant Colony Optimization*) en RWA 390
4.3.4. Empleo de PSO (*Particle Swarm Optimization*) en RWA 399
4.3.5. Empleo de ANN (*Artifical Neural Networks*) en el ensamble de ráfagas 401
4.3.6. Modelo de *Cross Layer* TCP/OBS 403
4.4. Definición de escenarios de pruebas 410
4.4.1. Ambientación 410
4.4.2. Modelos de comportamiento o de desempeño: 410
4.5. Plan de Pruebas 414
4.5.1. Consideraciones previas 414
4.5.2. Análisis de resultados sobre el desempeño del RWA para redes ópticas OBS basadas en GA con y sin métodos de control cognitivo 420
4.5.3. Escenarios de simulación para el análisis de la probabilidad de bloqueo en redes OBS con GA con y sin métodos de control cognitivo 421
4.5.4. Escenarios de simulación para analizar el tiempo de procesamiento en redes OBS basada en algoritmos genéticos con y sin métodos de control cognitivo 433
4.6. Resultados generales 437
4.6.1. Muestra comparativa de GA y GA + Cognición con ACO para RWA .. 438
4.6.2. Muestra comparativa de GA y ACO + PSO para RWA 438
4.6.3. Muestra comparativa de GA y ACO para RWA 439
4.6.4. Comportamiento de ANN sobre OBS 440
4.6.5. Comportamiento general de CL 446

4.7. Conclusiones del Capítulo 450
Capítulo 5 455
Conclusiones, recomendaciones y Trabajos propuestos 455
5.1. Introducción 455
5.2. Conclusiones 456
5.2.1. Sobre la Tesis (metodología seguida, temáticas tratadas y aportes realizados) 456
5.2.2. Sobre el desarrollo del trabajo de investigación 458
5.2.3. Sobre la inclusión de métodos Cognitivos en redes OBS 459
5.2.4. Sobre la inclusión de diseño orientado a *cross layer* (nodos, red y con otros protocolos) 460
5.3. Recomendaciones 462
5.3.1. Listado de posibles iniciativas de proyectos 463
5.3.2. Clasificación de las propuestas 466
Referencias Bibliográficas 469

Apéndices y Anexos en carpetas aparte.

Lista de Figuras

Capítulo 1

Figura 1.1. Modelo general de una red de comunicaciones ópticas..... 2
Figura 1.2. Evolución de las metodologías de transporte óptico con WDM (Vokkarane 2005) 3
Figura 1.3. Bandas del espectro óptico y la ubicación de las longitudes de onda para CWDM según ITU-T 8
Figura 1.4. Bandas del espectro óptico y la ubicación de las longitudes de onda para DWDM según ITU-T 8
Figura 1.5. Rangos de las ventanas y bandas de transmisión en los sistemas de transmisión ópticos (Jachetta 2013) 9
Figura 1.6. Modelo de enlace físico DWDM destacando sus componentes..... 10
Figura 1.7. Modelo de simulación de un sistema DWDM en OptSim™ de synopsys 11
Figura 1.8. Nuevas fibras y tecnologías de multiplexación (Morioka *et al.* 2012)..... 12
Figura 1.9. Esquema general de un nodo OXC..... 21
Figura 1.10. Red por conmutación óptica de circuitos OCS (Klinkowski 2007)..... 22
Figura 1.11. Formato general del paquete óptico. El-Bawab & Shin (2002)..... 25
Figura 1.12. Red por conmutación óptica de paquetes (Klinkowski 2007) 26
Figura 1.13. Arquitectura general de un nodo OPS a) diagrama en bloques (Maier 2008), b) Diagrama con mayor detalle (El-Bawab & Shin 2002) 27
Figura 1.14. Estructura de una ráfaga en OBS 31
Figura 1.15. Estructura básica de un BCP (Franzl *et al*. 2011) 31
Figura 1.16. Proceso de envío de ráfagas en OBS..... 32
Figura 1.17. Red por conmutación óptica de ráfagas (Klinkowski 2007)..... 33
Figura 1.18. Esquema funcional de una red OBS 34
Figura 1.19. Modelo de Nodo de ingreso OBS: a) incluye conmutador y b) incluye planificador de ráfagas 36
Figura 1.20. Clasificación de los esquemas de señalización 38
Figura 1.21. Señalización OBS (a) centralizada con reserve *two-way* y (b) distribuida con reserva *one-way* (Battistelli & Perros 2003)..... 39

Figura 1.22. Mecanismos de planificación de ráfagas en OBS 42
Figura 1.23. Grafico del costo AW para $\boldsymbol{\lambda ija} > \mathbf{1}$ 49
Figura 1.24. Comparación entre algoritmos HLDA, TILDA y MLDA 56
Figura 1.25. Arquitectura de un nodo de núcleo 57
Figura 1.26. Separación en plano de datos y plano de control en una red OBS (Cheng, Qiao & Yu 2004) 61
Figura 1.27. Relación temporal entre el BCP y la ráfaga de datos 61
Figura 1.28. Planos de control y de datos en OBS (Klinkowski 2007) 62
Figura 1.29. Modelo de cola para el BCP 63
Figura 1.30. Modelo de nodo de borde OBS con elementos MPLS 68
Figura 1.31. Nodo central OBS de prueba 70
Figura 1.32. Topologías WRON física y lógica 72

Capítulo 2

Figura 2.1. Procesos de ensamble y desensamble de ráfagas en los nodos de borde en una red OBS (Chen, Qiao & Yu 2004) 92
Figura 2.2. Red OBS destacando canales de control transportando BCP y canales de datos transportando ráfagas 92
Figura 2.3. Efectos de los diferentes parámetros en la definición de las ráfagas (tomado de www.ietf.org) 96
Figura 2.4. Modelo general de una ráfaga de paquetes 97
Figura 2.5. Ejemplo de referencia para la obtención de las métricas de primer orden 99
Figura 2.6. Modelo de ráfaga OBS 100
Figura 2.7. Esquema de un ensamblador de ráfagas 101
Figura 2.8. Interrelación entre el tiempo *offset* y el tamaño de la ráfaga 102
Figura 2.9. Modelo Poisson ON-OFF 104
Figura 2.10. Algoritmos de ensamble por tiempo y longitud de ráfaga. Yu, Qiao & Liu (2004) 107
Figura 2.11. Operación de los métodos básicos a) por tiempo fijo $\boldsymbol{T}$ y b) por longitud fija $\boldsymbol{B}$ (B=5) 108
Figura 2.12. Método híbrido para ensamble de ráfagas en OBS, a) $\boldsymbol{T}$ y $\boldsymbol{B}$ lo que suceda primero, b) empleo del relleno para completar $\boldsymbol{Bmin}$ 110
Figura 2.13. Operación del algoritmo hibrido para ensamble de ráfagas en OBS ... 110
Figura 2.14. a) Modelo de cola FIFO y b) características de histéresis 114

Figura 2.15. Esquema de tamaño de ráfaga tipo estado (contador *cross over*)..... 115
Figura 2.16. Algoritmo para el cálculo dinámico del tamaño de ráfaga..... 116
Figura 2.17. Protocolo JET usado en OBS 125
Figura 2.18. a) DR sin *buffer* y b) DR con *buffer* (Chen, Qiao & Yu 2004)..... 127
Figura 2.19. Resultados de la evaluación de desempeño para JET con y sin DR .. 132
Figura 2.20. Formato BCP para un caso de estudio OBS..... 133
Figura 2.21. Resultados BLP y retardos (*Delay*) para el escenario propuesto con la red NSFNet 137
Figura 2.22. a) contención de ráfaga de baja prioridad con ráfaga de alta prioridad. b) contención de ráfaga de alta prioridad con ráfaga de baja prioridad. c) contención entre ráfagas de igual prioridad con ráfagas largas. d) contención entre ráfagas de igual prioridad con ráfagas cortas (Chaing *et al.* 2007) 141
Figura 2.23. Única clase por ráfaga 146
Figura 2.24. Ráfagas compuestas por varias clases..... 147
Figura 2.25. Gráficas de BLP y retardo promedio (*Average Delay*) versus carga de tráfico normalizada 148
Figura 2.26. Modelo de interrelación TCP/IP y OBS 163
Figura 2. 27. Modelo funcional de una red OBS..... 163
Figura 2.28. Diagrama en bloques de una red OBS (basado en Verma, Chaskar, & Ravikanth (2000))..... 164
Figura 2.29. Nodo Borde de Ingreso (*Ingress Edge Node*) en una red OBS..... 166
Figura 2.30. Propuesta de ensamblador de ráfagas (*Burstifier*)..... 167
Figura 2.31. Diagrama de intercambio de información entre bloques en BAT 169
Figura 2.32. Módulo de transmisión de BCP y ráfaga..... 171
Figura 2.33. Variante del módulo de ensamble de ráfagas con planificador de entrada 172
Figura 2.34. Variante del módulo de ensamble de ráfagas con planificación centralizada..... 172
Figura 2.35. Nodo Borde de Egreso (Xiong, Vandenhoute & Cancaya 2004)..... 173
Figura 2.36. Modelo general de un nodo de borde OBS (ingreso y egreso) 174
Figura 2.37. Modelo en bloques de un planificador de ráfagas (Xiong, Vandenhoute & Cancaya 2004)..... 174
Figura 2.38. Modelo de un nodo central (Cancaya 2004) 175

Figura 2.39. Modelo en bloques del procesador de BCP (Xiong, Vandenhoute & Cankaya 2004) 176
Figura 2.40. Modelo en colas a) M/M/1 con eliminación, b) M/D/1/K (Klinkowsky 2007) 176
Figura 2.41. Nodo de borde empleado en el ejemplo 178
Figura 2. 42. Probabilidad de bloqueo de ráfaga 184
Figura 2.43. Probabilidad de bloqueo de ráfaga vs promedio de carga ofrecida 185
Figura 2.44. Promedio de probabilidad de bloqueo de ráfagas para JET y CR 186
Figura 2.45. Empleo de conversores de longitudes de onda normalizado 186
Figura 2.46. Escenarios de prueba para a) OBS y b) LOBS 188
Figura 2.47. a) Ventana de congestión TCP y b) ventana de transmisión TCP 191

Capítulo 3

Figura 3.1. Relación entre parámetros de la QoS respecto al envío de datagramas IP 203
Figura 3.2. Elementos asociados con QoS (www.cisco.com) 204
Figura 3.3. Clasificación de las arquitecturas cognitivas (Amanna & Reed 2010) ... 208
Figura 3.4. Diagrama en bloques del modelo ACT-R de Anderson 209
Figura 3.5. Ciclo cognitivo representado mediante STD (modificado a partir de Mahmoud 2007, p. 207) 211
Figura 3.6. Modelo de ciclo cognitivo propuesto por Mitola (2000) 212
Figura 3.7. Modelo OODA propuesto por Boyd 213
Figura 3.8. Modelo de sistema cognitivo (propuesta del autor) 218
Figura 3.9. Representación de los procesos cognitivos por planos (Thomas 2000) 221
Figura 3.10. Modelo CogNet (Raychaudhuri *et al.* 2006), gráfica recreada por el autor 225
Figura 3.11. Arquitectura SDN (ONF 2012) 226
Figura 3.12. Modelo de red cognitiva por niveles (Thomas *et al.* 2007), gráfica recreada por el autor 228
Figura 3.13. Modelo de tres niveles (Marr 1982) 229
Figura 3.14. Plano de Conocimiento KP (Strassner 2007), gráfica recreada por el autor 230
Figura 3.15. Arquitectura completa de alto nivel FOCALE 231
Figura 3.16. Arquitectura conceptual CHRON (CHRON 2011) 233

Figura 3.17. Arquitectura básica de nodo cognitivo (gráfica recreada por el autor con elementos de Kliazovich *et al.* 2010) 235
Figura 3.18. Modelo general de ciclo cognitivo aplicado en COGNITION 238
Figura 3.19. Modelo de la arquitectura COGNITION (Zervas & Simeonidou 2010) 238
Figura 3.20. Arquitectura del nodo óptico cognitivo a partir de Zervas & Simeonidou (2010) 240
Figura 3.21. Arquitectura de red óptica cognitiva propuesta por (Tronco *et al.* 2013) 242
Figura 3.22. Extensión del plano de control GMPLS (Tronco *et al.* 2013)..... 243
Figura 3.23. Plano de control en CCNP (gráfico del autor) 244
Figura 3.24. Una generación en algoritmos evolutivos..... 250
Figura 3.25. Técnica de refuerzo con recompensa (Sutton & Barto 1998)..... 252
Figura 3.26. Modelo de referencia OSI en un proceso de comunicación en un sentido y las unidades de datos que se intercambian extremo a extremo y entre niveles de la arquitectura ($\boldsymbol{ENi}$: Encabezamiento de Nivel $\boldsymbol{i}$, con $\boldsymbol{i} = \mathbf{1}, \dots, \mathbf{7}$) 259
Figura 3.27. Modelo TCP/IP e intercambio de información entre niveles y extremo a extremo 262
Figura 3.28. Diferentes opciones de CL, considerando que las representaciones rectangulares son arquitecturas o pilas de protocolos en niveles 263
Figura 3.29. Propuestas de diseño CL con nuevos enfoques 266
Figura 3.30. Modelo general de CL (*Cross Layer*) con Base de Datos BD compartida 268
Figura 3.31. Carga ofrecida versus *throughput* 274
Figura 3.32. Profundidad de encolamiento y utilización del ancho de banda..... 275
Figura 3.33. Relación CAPEX, OPEX y QoS 279
Figura 3.34. Mecanismos de encolamiento para garantizar QoS a diferentes servicios 288
Figura 3.35. Modelo de referencia para medidas de QoS en la red OBS propuesta289
Figura 3.36. Proceso de tráfico en una red de comunicaciones..... 295
Figura 3.37. Clasificación de mecanismos para provisión de QoS en redes OBS .. 295
Figura 3.38. Relación entre aprendizaje, conocimiento, desempeño y el entorno o ambiente..... 297
Figura 3.39. Representación general del proceso de memorización en humanos .. 299

Figura 3.40. Arquitectura cognitiva basada en memorias (recreado a partir del modelo Soar) 300
Figura 3.41. Aplicación general del ciclo cognitivo a una red OBS 304
Figura 3.42. Relación doble ciclo cognitivo 305
Figura 3.43. Modelo general de la propuesta de arquitectura cognitiva ARCO (Arquitectura de Red Cognitiva) 307
Figura 3.44. Modelo orientado a nodo (borde y central) niveles MAC y PHY 309
Figura 3.45. Modelo de agente inteligente con abstracción ARCO sobre OBS 310
Figura 3.46. Modelo de Nodo Cognitivo nodo de Borde OBS 311
Figura 3.47. Modelo de Nodo Cognitivo nodo Central OBS 311
Figura 3.48. ArQoS arquitectura basada en QoS 313
Figura 3.49. Formato de la PDU BCP y la *frame* BCP 315
Figura 3.50. Estructura de la *frame* OBS para la DB 316
Figura 3.51. Descripción básica de la suite TCP/IP 316
Figura 3.52. Modelo inicial por capas IP sobre OBS e IP sobre WDM 320
Figura 3.53. IP puede considerar a OBS como un nivel de enlace o MAC 321
Figura 3.54. Modelo en capas OBS comparado con OSI y TCP/IP 321
Figura 3.55. Descripción funcional y acciones de los niveles electrónico, opto electrónico y óptico 323
Figura 3.56. Unidades de datos involucradas en la comunicación TCP/IP sobre OBS 324
Figura 3.57. Modelo de interacción propuesto para transporte TCP/IP sobre OBS 324
Figura 3.58. Modelo conceptual IP/OBS dividido en dominios 326
Figura 3.59. Arquitectura funcional por planos en comunicación TCP extremo a extremo 326
Figura 3.60. Modelo de interacción TCP/IP sobre OBS 327
Figura 3.61. Modelo físico de interacción TCP sobre OBS 328
Figura 3.62. Modelo CL orientado a los planos OBS 329
Figura 3.63. Modelo general de CL para un nodo OBS 330
Figura 3.64. Abstracción de un modelo de nodo de red y de un CL 331
Figura 3.65. a) y b) Visiones similares de una Arquitectura TCP/IP sobre OBS 333
Figura 3.66. Propuesta de un diseño orientado a *Cross Layer* para TCP/OBS (CL-TCP/OBS) 334

Capítulo 4

Figura 4.1. Procedimiento propuesto para elaborar Modelos de Desempeño y Simulación 343
Figura 4.2. Modelo Funcional de una red OBS 344
Figura 4.3. Escenario multimedia sobre OBS 352
Figura 4.4. Modelo inicial de una red WAN OBS 353
Figura 4.5. Ciclo de diseño de redes *top-down* (Oppenheimer 2009) 354
Figura 4.6. Eficiencia en el uso del ancho de banda por PDU grandes y pequeñas 357
Figura 4.7. Profundidad de la cola vs utilización del BW (gráfica del autor) 357
Figura 4.8. Topología y distribución geográfica de la red de pruebas TEST 363
Figura 4.9. Topología de red NSFNeT 363
Figura 4.10. Topología de red EON 364
Figura 4.11. Topología de red GEANT 2 365
Figura 4.12. Sistema de Comunicaciones ópticas basado en WDM 367
Figura 4.13. Modelo en bloques de un OSF 368
Figura 4.14. Modelo del nodo de borde o frontera (*edgeNode – ingress/eggress*) . 369
Figura 4.15. Ubicación y aplicación de la meta heurísticas y la cognición 370
Figura 4.16. Diagrama funcional de un nodo central 371
Figura 4.17. Diagrama funcional de un nodo compuesto o mixto 371
Figura 4.18. Módulo Host fuente – destino 373
Figura 4.19. Diagrama en NED del Nodo OBS 374
Figura 4.20. Topología de red TEST 374
Figura 4.21. Topología de red NSFNeT 375
Figura 4.22. Topología de red EON 375
Figura 4.23. Topología de red GEANT 2 376
Figura 4.24. Estructura de un GA clásico 379
Figura 4.25. Operador cruce basado en un punto (cadenas de longitud l = 10) 381
Figura 4.26. Operador mutación 381
Figura 4.27. Representación codificada tres rutas. En orden de arriba-abajo: {1, 3, 6}, {1, 2, 5, 6}, {2, 4, 5, 6} 382
Figura 4.28. Diagrama de flujo para la operación del GA 383
Figura 4.29. Método de selección de Ruleta sesgada 388
Figura 4.30. Diagrama de flujo del GA 389
Figura 4.31. Generación de rutas incluyendo control cognitivo 390

Figura 4.32. Representación de tres (3) rutas con el mismo destino. En orden de arriba-abajo: {1, 3, 6}, {1, 2, 5, 6}, {2, 4, 5, 6}..... 392
Figura 4.33. Proceso típico que sigue un algoritmo ACO..... 394
Figura 4.34. Diagrama de flujo para ACO 395
Figura 4.35. Algoritmo general para PSO..... 400
Figura 4.36. Modelo general de perceptrón simple 401
Figura 4.37. Funcionalidad del módulo cognitivo para ensamble..... 402
Figura 4.38. Formato PDU TCP 403
Figura 4.39. Modelo *Cross Layer* TCP/OBS..... 409
Figura 4.40. Estado de tiempos de la red (Graña 2005)..... 416
Figura 4.41. Muestra de la Interfaz gráfica de usuario *TKenv* para el análisis del tiempo de procesamiento 417
Figura 4.42. Probabilidad de bloqueo con *offset* máximo de 72 μs 423
Figura 4.43. Probabilidad de bloqueo con *offset* máximo de 42 $\boldsymbol{\mu s}$ 423
Figura 4.44. Probabilidad de bloqueo con *offset* máximo de 32 μs 424
Figura 4.45. Probabilidad de bloqueo de la red usando algoritmos genéticos para diferentes tiempos máximos de *offset*. 425
Figura 4.46. Probabilidad de bloqueo de la red usando algoritmos genéticos con control cognitivo y diferentes tiempos máximos de *offset*..... 426
Figura 4.47. Comparación de la probabilidad de bloqueo de la red OBS algoritmos genéticos con y sin cognición para diferentes tiempos máximos de *offset* 427
Figura 4.48. Efecto de la variación de la velocidad de transmisión 429
Figura 4.49. Efecto de la variación de las longitudes de onda NSFNeT1..... 430
Figura 4.50. Efecto de la variación de las generaciones en el AG 432
Figura 4.51. Efecto de la variación de las generaciones en el AG + COG 432
Figura 4.52. Efecto de la variación de las generaciones en el AG con y sin cognición 433
Figura 4.53. Efecto de la variación del número de rutas iniciales para el análisis del tiempo de procesamiento trabajando con AG..... 434
Figura 4.54. Efecto de la variación del número de rutas iniciales para el análisis del tiempo de procesamiento trabajando con AG con control cognitivo 435
Figura 4.55. Comparación para AG con y sin cognición para una población inicial de 5 rutas en la estimación del tiempo de procesamiento 436

Figura 4.56. Comparación para AG con y sin cognición para una población inicial de 6 rutas en la estimación del tiempo de procesamiento 436
Figura 4.57. Comparación para AG con y sin cognición para una población inicial de 7 rutas en la estimación del tiempo de procesamiento 437
Figura 4.58. Comparación entre ACO y GA 438
Figura 4.59. Comparación entre ACO+PSO y GA 439
Figura 4.60. Comparación PB para GA y ACO 440
Figura 4.61. Impacto del valor de T para ensamble de ráfagas red OBS..... 441
Figura 4.62. Comportamiento del *throughput* al variar el umbral B 441
Figura 4.63. Módulo de Control MC para el *Burstifier* OBS..... 443
Figura 4.64. Prueba del MC en escenario respecto al número de lambdas..... 444
Figura 4.65. Comparación de escenarios con la inclusión del MC..... 445
Figura 4.66. Resultados de AG + COG e incluyendo MC a 2,5Gbps..... 445
Figura 4.67. Modelo de interacción TCO/OBS (López 2014) 447
Figura 4.68. Muestra comparativa entre tres topologías para el soporte de TCP ... 448
Figura 4.69. Probabilidad de Bloqueo para tres (3) escenarios..... 449
Figura 4.70. Degradacion de Throughput TCP con el aumento de BP (AG+COG). 450

Lista de Tablas

Capítulo 1

Tabla 1.1. Resumen de características lineales y no lineales que presentan los sistemas de comunicación por fibra óptica 12
Tabla 1.2. Resumen de Evolución de WDM (Farahmand 2005) 16
Tabla 1.3. Granularidad en la conmutación en redes ópticas (Maier 2008, pp. 24) .. 20
Tabla 1.4. Comparación entre distintos algoritmos de planificación 42
Tabla 1.5. Impacto de los efectos lineales y no lineales en redes WSON (Lázaro 2010) 44
Tabla 1.6. Estrategias de encaminamiento 45
Tabla 1.7. Algoritmos de encaminamiento clásicos (Lázaro 2010) 47
Tabla 1.8. Resumen de esquemas para resolver el problema RWA 52
Tabla 1.9. Comparación de distintos esquemas de resolución de contención (Anan, Chaudhry & Benhaddou 2006) 60
Tabla 1.10. Breve comparación entre los paradigmas OCS, OBS y OPS 76
Tabla 1.11. Comparación entre OCS, OBS y OPS (González 2012) 76

Capítulo 2

Tabla 2.1. Algoritmos de ensamble de ráfagas 117
Tabla 2.2. Resumen de diferentes técnicas de señalización OBS 134
Tabla 2.3. Ecuaciones para el cálculo analítico de JET y JIT y para nodos intermedios 136
Tabla 2.4. Parámetros típicos para escenarios de simulación OBS 136
Tabla 2.5. Políticas de QoS para varios escenarios de contención 142
Tabla 2.6. Resumen de Técnicas de QoS en OBS 150
Tabla 2.7. Comparación de algunos algoritmos de encaminamiento 155
Tabla 2.8. Alternativas para aliviar la pérdida de ráfagas en redes OBS 161
Tabla 2.9. Principales experimentos tipo *test beds* sobre OBS 162
Tabla 2.10. Desempeño de los modelos de colas (Klinkowsky 2007) 177

Tabla 2.11. Comparación entre versiones de TCP 192

Capítulo 3

Tabla 3.1. Clasificación de tipos de razonamiento empleado en redes cognitivas .. 214
Tabla 3.2. Resumen de las opciones de formular problemas en ML 255
Tabla 3.3. Información susceptible de ser empleada en CL 272
Tabla 3.4. Políticas de descarte, deflexión y segmentación de ráfagas en contienda 285
Tabla 3.5. Resumen de mecanismos de control de contención en OBS 287
Tabla 3.6. Mecanismos de mejora y provisión de QoS diferenciada y absoluta..... 287
Tabla 3.7. Mecanismos para QoS E2E e ingeniería de tráfico TE en redes OBS ... 288
Tabla 3.8. Descripción funcional de una arquitectura cognitiva..... 303
Tabla 3.9. Resumen de la funcionalidad OBS 323
Tabla 3.10. Resumen de características de modelo CL-TCP/OBS 336

Capítulo 4

Tabla 4. 1. Requerimientos analizados sobre las herramientas de simulación 350
Tabla 4.2. Resumen inicial de características de la red OBS 360
Tabla 4.3a). Información sobre las topologías seleccionadas 362
Tabla 4.4b). Resumen muestra de parámetros empleados para simulación en OBS 416
Tabla 4.5. Especificaciones Técnicas de los equipos empleados para las pruebas de los dos modelos de red..... 420
Tabla 4.6. Características fijas en las redes del modelo de simulación..... 421
Tabla 4.7. Características establecidas en la primera prueba 422
Tabla 4.8. Probabilidad de bloqueo con *offset* máximo de 72 μs..... 422
Tabla 4.9. Probabilidad de bloqueo con un *offset* máximo de 42 μs..... 423
Tabla 4.10. Probabilidad de bloqueo con *offset* máximo de 32 μs..... 424
Tabla 4.11. Probabilidad de bloqueo de la red usando algoritmos genéticos para diferentes tiempos máximos de *offset* 425
Tabla 4.12. Probabilidad de bloqueo de la red usando algoritmos genéticos con control cognitivo y diferentes tiempos máximos de *offset*..... 426
Tabla 4.13. Comparación de la probabilidad de bloqueo de la red usando algoritmos genéticos con y sin cognición para diferentes tiempos máximos de *offset* 427

Tabla 4.14. Características establecidas en la segunda prueba 428
Tabla 4.15. Efecto de la variación de la velocidad de transmisión para un *offset* máximo de 72 μs 428
Tabla 4.16. Características establecidas en la tercera prueba..... 430
Tabla 4.17. Efecto de la variación de las longitudes de onda 430
Tabla 4.18. Características establecidas en la cuarta prueba..... 431
Tabla 4.19. Efecto de la variación de las generaciones en el AG 431
Tabla 4.20. Efecto de la variación de las generaciones en el AG + COG 432
Tabla 4.21. Efecto de la variación de las generaciones en el AG con y sin cognición 432
Tabla 4.22. Características establecidas en la cuarta prueba..... 434
Tabla 4.23. Efecto de la variación del número de rutas iniciales para en análisis del tiempo de procesamiento trabajando con AG 434
Tabla 4.24. Efecto de la variación del número de rutas iniciales para en análisis del tiempo de procesamiento trabajando con AG con control cognitivo..... 435
Tabla 4.25. Comparación para AG con y sin cognición para una población inicial de 5 rutas en la estimación del tiempo de procesamiento..... 435
Tabla 4.26. Comparación para AG con y sin cognición para una población inicial de 6 rutas en la estimación del tiempo de procesamiento..... 436
Tabla 4.27. Comparación para AG con y sin cognición para una población inicial de 7 rutas en la estimación del tiempo de procesamiento..... 437
Tabla 4.28. Comparación para AG con y sin cognición para una población inicial de 7 rutas en la estimación del tiempo de procesamiento..... 439
Tabla 4.29. Comparación para AG con y sin cognición para una población inicial de 7 rutas en la estimación del tiempo de procesamiento..... 439
Tabla 4.30. Valores para un escenario basado en la definición para NSFNeT1 448

Capitulo 5

Tabla 5.31. Clasificación sugerida sobre las propuestas realizadas 466
Tabla 5.2. Muestra comparativa de algunos trabajos consultados……460

Apéndices

Apéndice A.Listado de temas tratados en la Tesis
Apéndice B.Técnicas de Optimización y Machine Learning
B.1. Introducción
B.2. Búsqueda local y variantes
B.3. Búsqueda Tabú
B.4. Recocido Simulado
B.5. Optimización mediante colonias de hormigas ACO
B.6. Algoritmos Genéticos AG
B.7. Optimización por Enjambre de Partículas PSO
B.8. Redes Neuronales Artificiales – ANN
B.9. Técnicas de Optimización Multipropósito
B.10. Conclusiones
Apéndice C. Elementos básicos sobre Conmutadores Ópticos
C.1. Introducción
C.2. Clases de conmutadores ópticos
C.3. Características de los OSF
C.4. Como seleccionar un conmutador según la aplicación
Apéndice D. Generalidades sobre Simulación de Eventos Discretos
D.1. Introducción
D.2. Simulación por Eventos Discretos
D.3. Algoritmo temporal de eventos programados
D.4. Modelación para la simulación computarizada
Apéndice E.Herramientas de Simulación
E.1. Introducción
E.2. El simulador NS
E.3. El simulador NetSim
E.4. Herramienta OPNET™
E.5. OMNeT++ IDE

E.6. Comparación de Herramientas
E.7. Conclusión
Apéndice F. Simulador de red basado en OMNeT++
F.1. Descripción general de OMNeT++
F.2. Simulador OBS diseñado
F.3. Conclusiones
Apéndice G. Conmutación Óptica de Paquetes OPS
G.1. Introducción
G.2. Aspectos generales
G.3. Arquitectura genérica de un conmutador OPS
G.4. Resolución de la Contención en OPS
G.5. Conversión de longitud de onda
G.6. Resolución de contención Unificada
G.7. Servicios diferenciados
G.8. Auto encaminamiento
G.9. Ejemplos de arquitectura de nodos
G.10. Implementación de OPS
Apéndice H. Elementos para un diseño OBS
H.1. Introducción
H.2. Fases de Diseño
H.3. Metas de negocio
H.4. Aplicaciones de red
H.5. Metas Técnicas
H.6. Visión General de la Metodología
Apéndice I. Aspectos funcionales del Protocolo TCP
Apéndice J. Módulo TCP

Anexos

Anexo 1. Asignaturas, Tutorial & Propuesta
- 1.1. Asignatura 1. Redes Avanzadas de Comunicaciones Ópticas
- 1.2. Asignatura 2. Sistemas de Comunicaciones Ópticas
- 1.3. Como desarrollar un artículo científico
- 1.4. Propuesta General de Línea de Investigación en ComunicacionesÓpticas
- 1.5. Tutorial OMNeT++

Anexo 2. Reportes de avances de Tesis
- 2.1. Año 2009
- 2.2. Año 2010
- 2.3. Año 2011
- 2.4. Año 2012
- 2.5. Año 2013

Anexo 3. Documentación por Capítulos
- 3.1. Capítulo 1
- 3.2. Capítulo 2
- 3.3. Capítulo 3
- 3.4. Capítulo 4
- 3.5. Capítulo 5

Anexo 4. Metodología de Simulación – Perspectiva Práctica
- 4.1. Ambientación Inicial
- 4.2. Introducción
- 4.3. Fases
  - 4.3.1. Definir el Problema
  - 4.3.2. Diseño del estudio
  - 4.3.3. Diseño del modelo conceptual
  - 4.3.4. Formular insumos, suposiciones y definición de procesos

4.3.5. Construir, verificar y validar el modelo de simulación
4.3.6 Experimentar con el modelo y buscar opciones para el diseño de experimentos
4.3.7. Documentar y presentar los resultados
4.3.8. Definir el ciclo de vida del modelo
4.4. Referencias
Anexo 5. Metodología Top-Down para el diseño de redes – visión general
Introducción
Ciclo de Diseño e Implementación de red
5.1. Fase 1. Análisis de Requisitos
5.2. Fase 2. Diseño Lógico de Red
5.3. Fase 3. Diseño Físico de la Red
5.4. Fase 4. Prueba, Optimización y Documentación del Diseño de Red
5.5. Conclusiones
Anexo 6. Simulación y datos de salida
6.1. Análisis de los datos de salida
6.2. Tipos de Simulación
Anexo 7. Optimización por enjambre de partículas PSO
7.1. Introducción
7.2. Descripción del Algoritmo
7.3. Selección de los parámetros
7.4. Convergencia en PSO
7.5. Variantes de PSO
7.6. Resumen
Anexo 8. El Problema RWA
8.1. Introducción
8.2. Topología Lógica en redes WRON
8.3. Elección de la Topología Lógica
8.4. Selección de meta heurísticas
8.5. Resolución del problema RWA
Anexo 9. Propuesta de enlace DWDM y Problema Min-Max
Anexo 10. Referencing_Harvard_ Complete
Anexo 11. Apartes de algoritmos de Modelo de Simulación para redes OBS de prueba

Lista de Siglas

ACK	*Acknowledge*, Reconocimiento Positivo
ACO	*Ant Colony Optimization*, Optimización por Colonia de Hormigas
ADM	*Add/Drop Multiplexer*, Multiplexor de Adición y Extracción
ANN	*Artificial Neural Networks*, Redes Neuronales Artificiales
API	*Application Programming Interface*, Interfaz de Aplicación Programable
AQ	*Assembler Queue*, Cola de Ensamble
ARQ	*Automatic Retransmission reQuest*, Solicitud automática de retransmisión
ASON	*Automatically Switched Optical Network*, Red Óptica Conmutada Automáticamente
ASTN	*Automatically Switched Transport Network*, Red de Transporte Conmutada Automáticamente
ATM	*Asynchronous Transfer Mode*, Modo de Transferencia Asincrónico
BCP	*Burst Control Packet,* Paquete de Control de Ráfaga
BHP	*Burst Header Packet*, Paquete de Encabezamiento de Ráfaga
CAPEX	*Capital Expenditures*, Gastos de Capital
CBR	*Constant Bit Rate*, Velocidad de Bit Constante
CBR	*Case-Based Reasonig*, Razonamiento Basado en Casos
CCNP	*Collaborative and Cognitive Network Platforms*, Plataformas de Red Cognitivas y Colaborativas
CD	*Chromatic Dispersion*, Dispersión Cromática
CDL	*Cognition Decription Langage*, Lenguaje de Descripción de Cognición
CHRON	*Cognitive Heterogeneous Reconfigurable Optical Network*, Red Óptica Heterogénea, Reconfigurable y Cognitiva
CL	*Cross Layer*, Nivel Cruzado
CN	*Cognitive Network*, Red Cognitiva

CWDM *Coarse Wavelength Division Multiplexing*, Multiplexación por División de Longitud de Onda Dispersa
DCN *Data Communication Network*. Red de Comunicación de Datos
DCS *Dynamic Class Selection*, Selección dinámica de Clase
DR *Deflection Routing*, Enrutamiento por deflexión de ruta
DRWA *Dynamic Routing and Wavelength Assignment*, RWA dinámico
DWDM *Dense Wavelength Division Multiplexing*, Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa
DXC *Digital Cross Connector*, Trans-conector Digital
EDFA *Erbium Doped Fiber Amplifier*, Amplificador de Fibra Dopada con Erbio
E-NNI *External Network to Network Interface*, Interfaz Externa Red a Red
FDL *Fiber Delay Line*, Línea de Retardo de Fibra
FEC *Forward Error Correction*, Correción de Errores hacia Adelante
FEL *Future Event List*, Lista de Eventos Futuros
FF *First Fit*, Fijar primero
FLR *Fuzzy Logic Reasoning*, Razonamiento por Lógica Difusa
FQ *Fair Queueing*, Cola con Prioridad
FRP *Fast Reservation Protocol*, Protocolo de Reserva Rápida
FRR *Forward Resource Reservation*, reserva de recursos hacia adelante
FSP *Fixed Shortest-Path,* Fijar el Camino más corto
FTTx *Fiber To The x*, Fibra hasta x
FWM *Four Wave Mixing*, Mezcla de Cuarta Onda
GFP *Generic Framing Procedure*, Procedimiento de Entramado Genérico
GMPLS *Generalized Multi-Protocol Label Switching*, Conmutacion de Etiquetas Multiprotocolo Generalizado
HOS *Hybrid Optical Switching*, Conmutación Óptica Híbrida
IETF *Internet Engineering Task Force*, Fuerza de Trabajo de Ingeniería de Internet
IP *Internet Protocol*, Protocolo Internet
ITU-T *International Telecommunication Union – Telecommunication*, Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector Telecomunicaciones
JET *Just Enough Time*, Suficiente Tiempo
JIT *Just In Time*, Justo a Tiempo
KP *Knowledge Plane*, Plano de Conocimiento

LASER *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación

LAUC *Latest Available Unscheduled Channel*, Ultimo Canal no planificado Disponible

LAUC-VF *Latest Available Unscheduled Channel – Void Filling*, Ultimo Canal no planificado disponible – Llenando vacíos

LTM *Long-Term Memory*, Memoria a Largo Plazo

LSR *Label Switch Router*, Enrutador de Conmutación de Etiquetas

KP *Knowledge Plane*, Plano de Conocimiento

MAN *Metropolitan Area Network*, Red de Área Metropolitana

MCL *Maximum Congested Link*. Enlace con máxima congestión.

Min-EV *Minimum Ending Void,* Espacio vacío intermedio mínimo

Min-SV *Minimum Starting Void,* Espacio vacío inicial mínimo

ML *Machine Learning*, Aprendizaje de Máquina

MLR *Mixed Line-Rate*, Velocidades de Línea Mezcladas

MPLS *Multi-Protocol Label Switching*, Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo

NACK *No Acknowledgement*, Reconocimiento Negativo

NCE *Network Cognitive Engine*, Motor Cognitivo de red

NGN *Next Generation Networks*, Redes de Próxima Generación

NIC *Network Interface Card*, Tarjeta de Interfaz de Red

NMI-A *Network Management Interface for ASON Control Plane*,

NMI-T *Network Management Interface for ASON Transport Plane*,

NMS *Network Management System*, Sistema de Gestión de Red

NRZ-OOK *Non Return to Zero – On/Off Keying*, Modulación OOK sin Retorno a Cero

NSF *National Software Foundation,* Fundación Nacional Del Software

NSF *National Science Foundation*, Fundación Nacional de la Ciencia

OADM *Optical Add and Drop Multiplexer*, Multiplexor Add/Drop

OBF *Oldest Burst First,* Primero la Ráfaga mas Antigua

OBS *Optical Burst Switching*, Conmutación Óptica de Ráfagas

OCC *Optical Connection Controller*, Controlador de Conexiones Ópticas

OCS *Optical Circuit Switching*, Conmutación Óptica de Circuitos

OFDM *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales
OLT *Optical Line Terminal*, Terminal de Línea Óptica
ONF *Open Networking Foundation*, Fundación para Interconexión Abierta
OPS *Optical Packet Switching*, Conmutación Óptica de Ráfagas
OPEX *Operational Expenditures*, Costos Operacionales
OSI *Open System Interconnection*, Interconexión de Sistemas Abiertos
OTN *Optical Transport Network*, Red Óptica de Transporte
OXC *Optical cross-connect*, Trans-conector Óptico
PMD *Polarization Mode Dispersion*, Dispersión por Modo de Polarización
PQ *Priority Queuing*, Encolamiento por Prioridad
PSO *Particle Swarm Optimization*, Optimización por Nubes de Partículas
QAM *Quadrature Amplitude Modulation*, Modulación por Amplitud en Cuadratura.
QoS *Quality of Service*, Calidad de Servicio
QoT *Quality of Transmission*, Calidad de Transmisión
RAM *Random Access Memory*, Memoria de Acceso Aleatorio
RMLSA *Routing, Modulation Level and Spectrum Allocation*, Enrutamiento, Nivel de Modulación y Asignación de Espectro
ROADM *Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer*, OADM reconfigurable
RR *Round Robin*,
RSVP *Resource Reservation Protocol*, Protocolo de Reserva de Recursos
RTT *Round Trip Time*, Tiempo de Viaje Redondo
RTO *Retransmission Time Out*, Vencimiento del Tiempo de Retransmisión
RWA *Routing and Wavelength Assignment*, Encaminamiento y Asignación de Longitud de Onda
SBS *Stimulated Brillouin Scattering*, Emisión Estimulada de Brillouin
SDH *Synchronous Digital Hierarchy*, Jerarquía Digital Sincrónica
SDM *Space Division Multiplexing*, Multiplexación por División de Espacio
SDN *Software-Defined Networking*, Interconexión de redes definidas por Software
SDR *Software-Defined Radio*, Radio Definido por Software
SLR *Single Line-Rate*, Única velocidad en línea
SNMP *Simple Network Management Protocol*, Protocolo Simple de Gestión de Red

SONET *Synchronous Optical NETwork*, Red Óptica Sincrónica
SPM *Self Phase Modulation*, Modulación de auto fase
SPF *Shortest Path First*, Primer camino más corto
SRS *Stimulated Raman Scattering*, Emisión Estimulada de Raman
STD *State Transition Diagrams*, Diagramas de Transición de Estados
STM *Synchronous Transport Module*, Módulo de Transporte Sincrónico
STS *Synchronous Transport Signal*, Señal de Transporte Sincrónico
SVM *Support Vector Machine*, Máquina Soportada Vectorialmente
TAG *Tell-And-Go,* Ve y dile
TAW *Tell-And-Wait,* Espera y dile
TCCN *Technical Committee on Cognitive Networks*, Comité Técnico sobre Redes Cognitivas
TCP/IP *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*, Protocolo de Control de Transmisión / Protocolo Internet
TDM *Time Division Multiplexing*, Multiplexación por División de Tiempo
TE *Traffic Engineering*, Ingeniería de Tráfico
TMN *Telecommunication Management Network*, Red de Gestión de Telecomunicaciones
TWC *Tunable Wavelengths Converters*, Convertidores de longitudes de onda Sintonizables
UECN *Upward Explicit Congestion Notification*, Notificación Explícita de Congestión hacia Arriba
UNI *User-to-Network Interface*, Interfaz Usuario a Red
VBR *Variable Bit Rate*, Velocidad de Bit Variable
WADM *Wavelength Add-Drop Multiplexers*, Multiplexores de Adición y Extracción de Longitud de Onda
WC *Wavelength Conversion*, Conversión de Longitudes de Onda
WDM *Wavelength Division Multiplexing*, Multiplexación por División de Longitud de Onda
WFQ *Weighted Fair Queuing*, Espera Equitativa Ponderada
WM *Working Memory*, Memoria de trabajo o a corto plazo
WROBS *Wavelength Routed Optical Burst Switching*, OBS por encaminamiento por longitud de onda
WRON *Wavelength Routed Optical Networks*, Redes Ópticas encaminadas por longitud de onda

WSON *Wavelength Switched Optical Networks*, Redes ópticas por conmutación de longitudes de onda

XPM *Cross-Phase Modulation*, Modulación por fase cruzada

Introducción General

En los últimos años el campo de la interconexión de redes ha experimentado un crecimiento a gran escala. La rápida expansión de Internet y la alta demanda de información multimedia ponen a prueba en muchos aspectos la infraestructura de comunicaciones desplegada en la actualidad (Goel & Sharma 2009). Las nuevas aplicaciones se caracterizan por consumir grandes anchos de banda (como ejemplos se citan: las redes sociales, los juegos en línea y servidores de video principalmente), requerir ejecución y respuesta en tiempo real, requerir un alto grado de interacción y manejar grandes volúmenes de almacenamiento e intercambiar datos con arquitecturas en la nube (*grid and cloud computing*). Igualmente, los usuarios finales de estos servicios esperan respuestas instantáneas y mínimos tiempos de carga y descarga de contenidos. Este crecimiento del volumen de tráfico en las redes está aún lejos de su fin y hay expectativas de que continúe en aumento motivado principalmente por la irrupción del tráfico multimedia proveniente de nuevos dispositivos móviles avanzados, como *smartphones*, *tablets*, consolas de juegos, Internet de las cosas entre otros, y se espera que generen, ya solo en el 2015, unos seis (6) exabytes de datos adicionales al mes (Cisco 2011). Existe entonces la necesidad inmediata de desarrollar nuevas redes e infraestructuras de red con alta capacidad de ancho de banda y de procesamiento de información que puedan soportar estas necesidades presentes y las que puedan surgir en el futuro.

Igualmente, en el entorno de la redes de comunicación, la fibra óptica es el medio de transmisión por excelencia para implementar los enlaces, brindando flexibilidad en el transporte, la instalación, un amplio rango de distancias entre redes, calidad y seguridad de la señal, entre otras (Grosz 2004). La implementación del Protocolo de Internet IP (*Internet Protocol*) (Puche 2008) sobre dicho medio, permite el flujo de datos multimedia y aprovecha el ancho de banda ofrecido por la fibra. De esta

manera comienzan a surgir los sistemas de comunicaciones basados en fibra óptica o sistemas de comunicaciones ópticos.

Según lo anotaban Jue & Vokkarane (2005) uno de los avances que ha prometido cumplir con estos requerimientos corresponde al de los sistemas de comunicación ópticos basados en la multiplexación por división de longitud de onda o WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), los cuales se han implementado como soporte (o *backbone*) en diferentes redes de comunicaciones. Con WDM cada fibra óptica puede transportar múltiples canales de comunicación donde cada canal puede estar operando sobre diferentes longitudes de onda (Maier 2008). Es así como cada sistema de transmisión tiene el potencial de proveer velocidades del orden de los 50Tbps en una sola fibra óptica, como se muestra en Kukuchi *et al.* (2001) y en Sano *et al.* (2013) donde también se encuentran resultados de pruebas a más de 400Tbps.

Igualmente, el tráfico en las redes tipo *core* o de transporte se incrementa en un alto porcentaje cada año, esto ha conducido al desarrollo de sistemas que a corto término puedan explotar al máximo la capacidad de los sistemas existentes de fibra óptica, lo cual obliga a que surjan nuevas alternativas en el desarrollo de los sistemas ópticos futuros.

Entre los desarrollos propuestos se encuentran los denominados sistemas de primera generación que constan de nodos electrónicos con enlaces ópticos punto a punto, estas clases de conexiones han sido empleadas como soporte para las redes basadas en SDH (*Syncrhonous Digital Hierarchy*) y SONET (*Synchronous Optical NETwork*), posteriormente y después de estudiar las características de la fibra óptica se busca la forma de usar el gran ancho de banda que la fibra brinda y poder distribuir ese potencial entre diferentes usuarios para lo cual se propone el uso de las técnicas de multiplexación por división de tiempo TDM (*Time Division Multiplexig*), de espacio SDM (*Space Division Multiplexing*) y por longitud de onda WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) siendo WDM la que mejores resultados ha brindado (Maier 2008), luego se incorpora la posibilidad de utilizar circuitos, caminos de luz o *lightpaths* y surgen tecnologías como la conmutación óptica de circuitos OCS (*Optical Circuit Switching*), de paquetes OPS (*Optical Packet Switching*) y de ráfagas OBS (*Optical Burst Switching*), en estas dos últimas tecnologías se busca reducir las conversiones de señales a nivel físico de ópticas a eléctricas y viceversa, de esta

manera se entra en la era de las redes completamente ópticas en la cual las conexiones de los diferentes caminos de luz o *lightpaths* se puedan realizar desde un nodo origen a otro destino a través de un núcleo completamente óptico y así se pueda transmitir la información en unidades de datos que pueden ser paquetes o ráfagas sin realizar conversiones de señales OEO (*Optical Electronic Optical*).

En este contexto, es necesario contar con técnicas que permitan transmitir de manera eficiente la información, por esta razón se utiliza la Conmutación Óptica de Ráfagas OBS (*Optical Burst Switching*) como método que integra las ventajas de la conmutación de paquetes y de circuitos (Battistelli & Perros 2003) ofreciendo mayor eficiencia al agrupar conjuntos de paquetes IP que tengan un mismo destino y generando menor cantidad de encabezados, lo que podría garantizar una disminución en el procesamiento y, por lo tanto, menor retardo en la transmisión de la información (Guillamón 2005).

Sumado a lo anterior y ante la necesidad de optimizar los recursos de la red, se han propuesto distintas alternativas para mejorar el desempeño de las redes tanto inalámbricas como alambradas, se han construido sistemas de gestión integrada que pueden llegar a ser complejos y de alto costo, se han definido arquitecturas con planos de control y gestión distribuidos que muchas veces obedecen a propósitos particulares, los cuales contribuyen a dar los primeros pasos hacia una nueva generación de redes que incluyan mecanismos de cognición con comportamientos inspirados en procesos y entornos biológicos (Mahmoud 2007), aparece entonces, toda una nueva generación de modelos y arquitecturas de redes que imitan el comportamiento de la sociología animal denominadas metaheuristicas (Talbi 2009) basadas en poblaciones entre ellos Colonia de Hormigas (Dorigo 1992), de Abejas, de Termitas, de Avispas, Cardúmenes, para luego entrar a imitar mecanismos propios del ser humano como los Algoritmos Genéticos, Redes Neuronales, procesos de pensamiento y memorización, toma de decisiones, propagación de virus y sistemas inmunes, entre otros. Se busca igualmente la futura construcción de sistemas de red autónomos que realicen la toma de decisiones basándose en información que adquieren del entorno y de la propia red (DaSilva & MacKenzie 2007), para ello se les provee de memoria y capacidad de aprendizaje en entornos dinámicos.

Los elementos mencionados hasta el momento contribuyen a formar una idea sobre el contexto general en el cual se enmarca el desarrollo de esta Tesis, siendo las redes de transporte (MAN o WAN) ópticas por conmutación de ráfagas OBS (Qiao & Yoo 1999) el modelo central hacia el cual se enfocan los esfuerzos de investigación. Igualmente, la Tesis incluye otra serie de conceptos como la cognición, arquitecturas de redes cognitivas, inteligencia artificial, meta-heurísticas, arquitectura de red Internet y modelos de arquitecturas *Cross Layer* entre otros, los cuales contribuyen definitivamente para determinar una propuesta de investigación que permita incluir estos elementos en una red OBS particularmente en sus nodos de frontera al momento de ensamblar y desensamblar las ráfagas de datos (o paquetes) y después su transporte a través de un núcleo óptico.

Todos estos elementos conducen a desarrollar una propuesta donde se busca en principio el empleo de métodos cognitivos en redes OBS y la interacción de estas redes con entornos como TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) a través de arquitecturas orientadas al diseño de nivel cruzado o *Cross Layer*.

En resumen, la idea central que se busca con este desarrollo es definir una alternativa que permita lograr como primera medida, una mejora en el desempeño de la red OBS a través de la inclusión de parámetros de QoS (principalmente disminución de retardos y disminución de la pérdida de información), para lograrlo se propone trabajar sobre el proceso de enrutamiento y asignación de longitud de onda o RWA (*Routing and Wavelength Assigment*) que tiene una incidencia directa sobre el desempeño de las redes OBS, este proceso está catalogado como un problema NP – COMPLETO (*Nondeterministic Polynomial Time*) (Rodriguez & Saavedra 2010; Barpanda *et al.* 2011) lo cual no permite encontrar un tipo de solución trivial por medio de algoritmos deterministas, pero que permite obtener soluciones aproximadas a la óptima. RWA, a su vez, presenta variantes de tipo estático y dinámico (Bandyopadhyay 2008) según la demanda de tráfico, siendo el RWA dinámico el que más se acerca a un entorno real de la red, ya que las peticiones de conexión para generar un camino óptico se presentan de manera aleatoria y la demanda de tráfico ocurre en tiempo real, orientando la evaluación del desempeño hacia la probabilidad de bloqueo de conexión o pérdida de ráfagas (Capmany & Ortega 2006).

Luego, como el tráfico total no se conoce de antemano (pero debe estimarse para realizar la simulación), numerosas técnicas para el RWA carecen de eficiencia teniendo como limitante el tiempo de reconocimiento, búsqueda y procesamiento para generar la solución adecuada (CHRON 2012).

Igualmente, se trabaja sobre el proceso de ensamble de ráfagas en los nodos de la red OBS dada la importancia que tiene para determinar los retardos que puedan surgir durante este proceso y su incidencia en los servicios que soporta la red OBS (Qiao & Yoo 1999). Por lo general se han propuesto dos métodos de ensamble que exhiben comportamientos diferentes ante variaciones dinámicas de trafico IP de entrada (Qiao 2000), el desarrollo de una propuesta que ayude a definir el tamaño adecuado de la ráfaga mediante la elección del método de ensamble apropiado ayuda a mejorar el desempeño global de la red.

Luego de analizar las diferentes alternativas que han surgido para gestionar la complejidad y utilización eficiente de recursos, la mayoría se fundamentan en métodos inspirados biológicamente aplicados al concepto de aprendizaje de máquina (Sifalakis & Hutchison 2005), por lo que se considera que contar con una arquitectura de control y gestión con elementos cognitivos puede contribuir a automatizar procesos dentro de la red OBS y con su entorno (clientes IP, ATM, SONET entre otros).

Específicamente, las redes inspiradas biológicamente se guían por mecanismos de adaptación, y en este sentido, el rendimiento es un factor que depende del número de iteraciones para obtener una solución adecuada. Numerosas áreas de investigación se encuentran explorando los métodos inspirados biológicamente, debido a las notables ventajas que ofrecen en cuanto a escalabilidad, estabilidad y flexibilidad ante cambios en la red (Lázaro 2010). Los algoritmos genéticos GA (*Genetic Algorithms*) hacen parte de estos procesos adaptativos, en donde la evolución es una táctica de supervivencia en entornos cambiantes usando métodos heurísticos como estrategias de optimización (Bisbal *et al.* 2004), igualmente las Redes Neuronales y otros métodos de Inteligencia de grupo referido a los comportamientos descentralizados y auto organizados reunidos en el concepto de SI (*Swarm Intelligence*) según Beni & Wang (1989).

Por último la prueba de los elementos cognitivos que se proponen se hace mediante el diseño de redes OBS y la definición de una arquitectura de interacción entre OBS y una red cliente, se selecciona una red basada TCP/IP y se propone un diseño orientado a *Cross Layer* basado principalmente en calibración vertical (Srivastava 2005).

Finalmente, en cuanto a la forma, la totalidad del documento de Tesis se emplea el estilo de referencia y citación Harvard[1] (autor año), sin la coma (,) intermedia (Primer Apellido del Autor Año de publicación, Numero de página (s)), ejemplo: (López 2014, pp.1-3). Igualmente, para la escritura de este documento se emplean las guías sugeridas por el programa de Doctorado[2].

De otro lado, algunas de las palabras clave más empleadas se escriben en inglés y en itálica, por ejemplo: *lightpath*, *Cross Layer* o *core,* entre otras. Esto se hace teniendo en cuenta que la mayoría de referencias bibliográficas están en inglés y algunos términos relevantes no cuentan muchas veces con una traducción al castellano que expresen la esencia semántica del mismo. Respecto a las figuras que aparecen en el documento principal, en los Anexos y Apéndices a menos que se aclare la referencia de donde fue tomada, se consideran que son figuras de autoría propia o con variantes, ajustes y aclaraciones propias.

Aportes, Objetivos y Estructura de la Tesis

1. Aportes de la Tesis

En el proceso de desarrollo de esta Tesis doctoral se han presentado dos momentos importantes respecto a la visión que se tiene sobre los aportes que ésta puede hacer. En los documentos preliminares como el anteproyecto y el documento sobre el examen de valoración, se describió una perspectiva de los posibles aportes que se buscaba realizar con el desarrollo de la misma. Posteriormente y a medida que se han ido obteniendo los objetivos trazados, han surgido diferentes contribuciones pertinentes con la búsqueda de la consolidación del área de investigación y

[1] http://sydney.edu.au/library/subjects/downloads/citation/Harvard_Complete.pdf y http://www.cqu.edu.au/?a=14032
[2] Guía para la Elaboración del Documento final de las Tesis Doctorales.

desarrollo en Redes de Comunicaciones Ópticas dentro del grupo de I+D GNTT. Lo anterior permite dividir esta sección en dos partes, la primera resalta los aportes propuestos inicialmente y la segunda parte muestra los que se han logrado concretar:

1.1. Aportes buscados

- Obtener un primer resultado del análisis de diferentes estudios científicos que se han hecho alrededor del planeta en el camino hacia una red completamente óptica (en infraestructura y funcionalidad) y la aplicación del concepto de lo cognitivo a dichas redes ópticas. Con estos elementos ayudar al cumplimiento del objetivo propuesto sobre lograr consolidar una base conceptual alrededor no solo de las redes ópticas en general, sino de las redes OBS, procesos de Cognicion, diseño orientado a *Cross Layer*, meta heurísticas, entre otros conceptos.

- Realizar un aporte importante en el ámbito de las redes OBS relacionado directamente con la mejora de procesos de enrutamiento y ensamble de ráfagas y la inclusión de métodos cognitivos en los nodos de frontera y centrales de las redes OBS.

- Resultados de analizar los avances mostrados en la literatura sobre el plano de datos y control OBS, y su interrelación con el nivel IP para el soporte del denominado Internet óptico.

- Obtener un diseño de *Cross Layer* dentro de una arquitectura de red óptica con control cognitivo que facilite (o permita) la interacción de algunos niveles de la arquitectura a través de su funcionalidad mediante el ciclo cognitivo, con el objetivo de soportar las posibles metas extremo a extremo (*goals end to end*) propuestas para la prestación de servicios.

- Contribuir directamente con la consolidación de la naciente área de investigación en Comunicaciones Ópticas dentro de la dinámica del grupo de Investigación en

Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones de la facultad de ingeniería electrónica y telecomunicaciones de la universidad del cauca (GNTT[3]).

1.2. Aportes obtenidos

- **Obtención de una base conceptual** del estado del arte en redes de comunicaciones ópticas incluyendo elementos cognitivos y su interacción con otras plataformas como TCP/IP a través de diseño *Cross Layer*. Esto básicamente se logra mediante la redacción de un documento en cinco (5) capítulos, fruto del estudio minucioso de un gran número de referentes bibliográficos, complementados con diez (10) Apéndices elaborados por el autor y una serie de Anexos. En cuanto a la bibliografía consultada esta se organiza en carpetas de acuerdo al capítulo donde se han empleado como referentes. Todo lo anterior permite obtener un compendio de una base conceptual sólida que hace menos difícil el desarrollar otras iniciativas de investigación en el área tanto en proyectos de I+D como en trabajos de grado de pregrado y posgrado (maestría y tesis doctorales).

- **Arquitectura de redes cognitivas**, el Capítulo 3 muestra diferentes modelos de arquitecturas de redes cognitivas propuestas, se analizan y se proponen nuevos modelos de arquitecturas de redes cognitivas por parte del autor en especial la Arquitectura ARCO (**A**rquitectura de **R**ed **C**ognitiva **O**BS). Este ha sido un aspecto de investigación donde no se han enocntrado trabajos al respecto en el ámbito Colombiano y en general la mayoría de la literaruta se enfoca a redes inalámbricas.

- **Arquitectura de referencia QoS extremo a extremo para redes OBS**, se propone un acercamiento a este concepto mediante la propuesta de modelo de referencia aplicable entre otras a redes a OBS e interconexión OBS, para ello en los Capítulos 3 y 4, se trata puntualmente el concepto de QoS.

- **Escenarios de Simulación**, en el Capítulo 4 se presentan los diferentes propuestas definidas como escenarios de simulación sobre los cuales se realizan

[3] GNTT: http://facultades.unicauca.edu.co/fiet/investigacion/nuevas-tecnologias-en-telecomunicaciones/lineas-de-investigacion

las pruebas, se trata de escenarios sobre redes ópticas OBS, redes OBS con métodos heurísticos, redes OBS con métodos cognitivos y la interacción con TCP/IP a través de modelos de *Cross Layer*.

- **Meta heurísticas basadas en poblaciones**, se realiza la propuesta de empleo mecanismos evolutivos basados en población como el caso de Algoritmos Genéticos GA (*Genetic Algorithms*) y Colonia de Hormigas ACO (*Ant Colony Optimization*) para resolver en principio el problema RWA en las redes OBS. Igualmente, se propone el empleo de PSO (*Particle Swarm Optimization*) y de ANN (*Artifical Neural Networks*) en procesos donde se reuiera de selección en las redes OBS. Igualmente se dan ideas para implementar algunos métodos basados en Colonia de Abejas BCO (*Bee Colony Optimization*).

- **Métodos Cognitivos**, empleo de estos métodos para lograr cierta autonomía de las redes OBS, se utiliza como referencia el modelo general del ciclo cognitivo y posteriormente la arquitectura propuesta.

- **Desarrollo y planteamiento de trabajos de grado y de Investigación** en el área de comunicaciones ópticas, entre ellos se encuentran, el desarrollo de esta Tesis ha dado lugar a proponer la ejecución de diferentes trabajos de grado tanto en pregrado como en posgrado al interior de la Universidad del Cauca, estos proyectos incluyen además el desarrollo de objetivos orientados a la capa física, MAC y Red, un listado es el siguiente:

Trabajos de grado de pregrado (concluidos y en ejecución):

- Análisis del problema de contención en redes OBS (*Optical Burst Switching*), cuyo aporte central es la medida en tiempo de los mecanismos de respuesta cuando ocurre contención.

- Evaluación del Impacto de los mecanismos de control de contención en redes OBS distribuidas. Análisis comparativo de los diferentes métodos de control de contención y su incidencia en el desempeño de una red OBS con topología definida.

- Inclusión de mecanismos cognitivos para resolver el problema de contención en redes OBS.

- Análisis del desempeño de redes OBS/WDM, se trata de una aproximación con la inclusión de métodos cognitivos para resolver el problema RWA.

- Evaluación del Impacto del formato de modulación sobre la densidad espectral de información en una red DWDM a 2.5Gbps y 10Gbps.

- Análisis del desempeño en la red OBS COST 239 aplicando *Swarm Intelligence* mediante el algoritmo ACO para resolver el problema RWA.

- Diseño de un compensador de Dispersión Cromática para redes metropolitanas DWDM a 2.5Gbps empleando súper estructuras de Mach Zehnder.

- Construcción de un método de control cognitivo basado en Colonia de Abejas BCO (*Bee Colony Optimization*) para resolver el problema de contención en reded WROBS.

- **Trabajos de grado de posgrado (concluidos y en ejecución):**

  - Análisis del desempeño de los formatos (RZ-NRZ)/DQPSK a 10 y 40 Gbps en una red metropolitana DWDM.

  - Análisis de la eficiencia espectral en redes DWDM a 40Gbps a través de formatos de modulación multinivel.

  - Análisis de la eficiencia espectral en redes DWDM a 40Gbps mediante el empleo de mecanismos de detección coherente.

- **Elaboración de proyectos de investigación** ante el Sistema de Investigación de la Universidad del Cauca:

- **Título**: Métodos de control cognitivo para optimización de enrutamiento en redes OBS y WROBS (*Wavelength Routed*) basados en SI (*Swarm Intelligence*).

- **Título**: Redes de Comunicaciones Completamente Ópticas: Procesamiento de Señales en el dominio óptico Parte 1 (POS-AON).

• **Artículos**: diagramados, publicados y en evaluación:

- López & Jojoa, 2010. *Advances toward "all optical" switching and Routing in Core Networks*. Revista GTI. Vol. 9 No. 23.

- López & Solarte, 2010. *About NGN (Next Generation Networks) in Colombia*. Revista GTI. Vol. 9 No. 23.

- López *et al.* 2013. *Artificial Neural Network-based Cognitive Control Method for burst assembling in OBS Networks*. Enviado al congreso *Nature and Biologically Inspired Computing* NaBIC 2014.

- López, Valencia & Hincapié, 2013. *Cognitive Control Base on Genetic Algorithm for Routing and Wavelength Assigment in Optical OBS/WDM Networks*. INNOV 2013. Lisbon. *Best Award Paper*.

- López, G. 2014. Meta e híper heurísticas basadas en SI (*Swarm Intelligence*). Enviado para publicación en revista B. Devuelto para correcciones.

- López & Jojoa 2013. Redes Ópticas Cognitivas como solución para Internet en el Futuro. Publicado en la revista ITECKNE. 2012.

- López *et al.* 2013*. Intelligent Optical Burst Switching (OBS) Networks*. Enviado a revista B. En corrección.

• **Generación de Cursos sobre redes ópticas**, se han propuesto tres (3) asignaturas sobre comunicaciones ópticas los cuales son impartidos en pre y posgrados.

- **Redes de Comunicaciones Ópticas Avanzadas (RACO)**. Cuyo contenido se encuentra en al Anexo 1. Se imparte en los programas de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones y de Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca.

- **Telecomunicaciones Ópticas (TELOP)**. Su contenido se encuentra en el Anexo 1. Se imparte en los programas de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones y de Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca.

- **Sistemas de Comunicaciones por Fibra Óptica (SCFO)**. Su contenido se encuentra en el Anexo 1. Se imparte en los programas de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones y de Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca.

- **Fundamento y Diseño de Redes Ópticas Pasivas PON-FTTX**. En proceso de propuesta para los programas de programas de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones y de Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca. El contenido tentativo se encuentra en el Anexo 1.

- **Simulación de sistemas de telecomunicaciones (SIMUTEL)**. En proceso de propuesta para los programas de programas de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones y de Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca.

1.3. Otros aportes:

- Documento donde se exponen algunas ideas de cómo desarrollar un artículo científico. Se encuentra incluido en el Anexo 1.

- Propuesta general e inclusión de una línea de investigación sobre telecomunicaciones ópticas, como línea adicional o dentro del área de investigación Redes Avanzadas de Telecomunicacionescomo se observa en el enlace institucional http://facultades.unicauca.edu.co/fiet/investigacion/nuevas-tecnologias-en-telecomunicaciones/lineas-de-investigacion. Este aspecto

implica la inclusión de redes cognitivas como nicho de investigación al interior del grupo GNTT. Se encuentra en el Anexo 1

- Tutorial sobre la herramienta OMNeT++. El cual se propone ante el poco conocimiento de la herramienta de simulación en Colombia. Se encuentra en el Anexo 1.

- Presentaciones de avances de la Tesis. Cerca de 40 presentaciones sobre avances de Tesis que se consignan en el Anexo 2. Se incluyen ya que constituyen una muestra del proceso de avance en la consolidación de la temática de Tesis, aunque se suministran solo de ser requeridos.

- Se incluye una agrupación de artículos y libros consultados en el desarrollo de la Tesis. La intención de este Anexo es realizar un primer compendio bibliográfico sobre la temática con el ánimo de contribuir con los nuevos proyectos que están en ejecución y otros que surjan sobre las temáticas abordadas. Estos se consignan en el Anexo 3. Se anota que para la gestión documental en general se hizo uso del gestor bibliográfico Mendeley (http://www.mendeley.com/), aunque existen diferentes alternativas al respecto.

- Se incluye un documento donde se propone una Metodología de Simulación para los cual se toman elementos de propuestas realizadas y se adapta una de estas metodologías. El enfoque principal de esta metodología es hacia la obtención de modelos de comportamiento y de simulacion. Esta se encuentra en el Anexo 4.

- Documento donde se propone una Metodología de Diseño de redes basado en la metodología *Top-Down*. Como en el caso anterior se toman elementos de la Top Down Network Design de CISCO ™. Se encuentra en el Anexo 5.

- Se redactan diez (10) Apéndices donde se desarrollan temáticas complementarias a diferentes aspectos de la Tesis.

- Se incluyen once (11) Anexos que contienen información adicional relevante sobre el desarrollo del trabajo de Tesis.

2. Objetivos de la Tesis

Objetivo General

Desarrollar una propuesta que muestre la utilización del control cognitivo enfocado a procesos funcionales en redes OBS.

Objetivos Específicos

- Obtener una base conceptual sólida sobre las diferentes tecnologías electro ópticas y completamente ópticas, en aspectos tales como cognicion, arquitecturas cognitivas, desempeño, métodos de optimización, rendimiento de la red, retardos, QoS, control de fallas y reconfiguración, diseño orientado a *Cross Layer* que faciliten la definición de ontologías cognitivas y parámetros de decisión dentro de la arquitectura de redes ópticas con enfoque cognitivo.

- Definir los requerimientos para la creación de un *Cross-Layer* cognitivo aplicable a una red óptica OBS enfocada hacia procesos funcionales en OBS (enrutamiento, ensamble y transporte de ráfagas), con ayuda de técnicas meta heurísticas para de aprendizaje de máquina ML (*Machine Learning*).

- Obtener un modelo viable de diseño orientado a *Cross-Layer* con métodos cognitivos mediante su validación empleando herramientas de simulación disponibles (preferiblemente OMNeT++).

3. Organización de la Tesis

Para el cumplimiento de los anteriores objetivos se requiere en principio la elaboración de una base conceptual sólida y la definición y obtención de modelos de desempeño o comportamiento y modelos de simulación aplicados a las redes OBS que incluyan elementos cognitivos, es así como todos y cada uno de los conceptos que se requieren para el desarrollo de la Tesis están contenidos en los capítulos 1, 2 y 3 del presente documento, para su elaboración se ha seguido un orden que va de lo general a lo particular realizando una búsqueda minuciosa y en detalle de cada

concepto involucrado tomando referentes bibliográficos de distintas latitudes del planeta en especial de Europa, Asia y Estados Unidos.

Para su elaboración se parte de la conceptualización y clasificación de las redes de comunicación ópticas, en seguida se particulariza el estudio hacia las redes por Conmutación Óptica de Ráfagas u OBS, luego se enfoca hacia los nodos de frontera (o *edge Nodes*) y en especial hacia los procesos de enrutamiento y ensamble de ráfagas con sus respectivos algoritmos de operación, siendo este el punto central donde se aplican las propuestas y los objetivos de la Tesis.

A lo anterior y para completar la conceptualización requerida se suman los conceptos de cognición y *Cross Layer* que permiten la interacción con cierto grado de autonomía entre una red OBS y la arquitectura TCP/IP. Igualmente, como muchos de los conceptos estudiados requieren ser ampliados no solo para cumplir con el primer objetivo sino que sirven como apoyo fundamental en el desarrollo de la Tesis, se ha elaborado una serie de Apéndices que buscan complementar el desarrollo teórico y práctico del presente trabajo, a lo cual se le suman varios Anexos y las referencias bibliográficas organizadas convenientemente. Como se puede inferir, son diferentes las temáticas involucradas en el desarrollo de esta Tesis para lo cual se ha elaborado el apéndice A donde se hace una clasificación con mayor detalle de las mismas.

Asimismo, en los capítulos 2, 3 y en especial el capítulo 4 se incluyen ejemplos de diseño y simulación con resultados que se van consignando en los mismos. En principio para la obtención de resultados se parte de un diseño, se produce un modelo de simulación, se ejecuta el modelo y se analizan los resultados. Para lograr de una forma metódica lo anterior, se propone una metodología para simulación orientada a eventos discretos (aunque puede tener un uso general) y se adapta la metodología conocida como *Top Down Network Design* para el diseño de las redes OBS a emplear.

En lo relacionado con las conclusiones, al final de cada capítulo se incluye una sección con conclusiones del capítulo. Igualmente, en el Capítulo 5 se incluyen además de conclusiones y recomendaciones sobre todo el trabajo, una serie de propuestas para posibles proyectos de investigación y trabajos de grado.

En seguida se hace una descripción con mayor detalle sobre la composición del presente documento de Tesis, el cual como se anota consta de cinco (5) capítulos, 215 figuras, 52 tablas, once (11) Anexos y diez (10) apéndices. Se recuerda que cada capítulo empieza con una introducción al mismo y se termina con una serie de conclusiones de lo tratado.

En el **Capítulo 1** se realiza una revisión referencial en detalle y se elabora un estado del arte sobre las redes ópticas de área extensa WAN (*Wide Area Networks*), sus distintas generaciones, las redes soportadas por WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) en especial las redes ópticas por conmutación de Circuitos OCS (*Optical Circuit Switching*), por Conmutación Óptica de Paquetes OPS (*Optical Packet Switching*) y por Conmutación Óptica de Ráfagas OBS (*Optical Burst Switching*) con esquema distribuido y centralizado WROBS (*Wavelength Routed OBS*) dependiendo del tipo de señalización empleada. Estos conceptos son de vital importancia para el desarrollo de la Tesis y enmarcan su contexto de aplicación.

En el **Capítulo 2** se realiza un estudio en profundidad del concepto de redes OBS se revisa en detalle los diferentes métodos de construcción de ráfagas, el problema de encaminamiento y asignación de longitudes de onda RWA (*Routing and Wavelength Assignment*), al final del mismo se incluyen algunos resultados sobre simulaciones sobre redes OBS.

En el **Capítulo 3** se realiza un completo análisis sobre lo que significa el concepto de Cognición y su aplicación en redes de comunicaciones, seguidamente se estudian las diferentes arquitecturas propuestas sobre redes cognitivas, algunos elementos de aprendizaje de máquina ML (*Machine Learning*), esta sección termina con la propuesta de la Arquitectura Cognitiva ARCO. Igualmente, se aborda el concepto de QoS complementando al Capítulo 2 y se propone un marco referente de QoS para OBS. La siguiente sección se dedica al estudio de los diseños orientados a *Cross Layer* y su aplicación en redes ópticas y al final se incluyen los diferentes diseños de arquitecturas CL cognitivas propuestas de simulación.

El **Capítulo 4** presenta los diferentes diseños y modelos de simulación OBS para el cálculo de la probabilidad de bloqueo de ráfagas, contrastados respecto al tiempo de simulacion y a la carga de tráfico aplicadas a los modelos de prueba para distintos

rangos de tiempo *offset*, principalmente. Se plantean los modelos de simulación sobre redes con topologías diversas para OBS sin la aplicación de métodos cognitivos y posteriormente se diseñan los métodos cognitivos para ser incluidos en las redes OBS, se incluye un modelo de prueba orientado a *Cross-Layer* donde se incluyen los modelos de red anteriores para comparar su desempeño y evidenciar la ventaja o no de incluir métodos cognitivos en las redes OBS y finalmente su interacción con la suite de protocolos TCP/IP, en particular con el protocolo TCP.

En el **Capítulo 5** se describen las conclusiones y los posibles trabajos que se derivan a partir del desarrollo de la Tesis. La importancia de este capítulo radica en que su contenido es un insumo muy importante para la consolidación del área de investigación en Comunicaciones ópticas dentro del Grupo de Investigación Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones GNTT de la Universidad del Cauca.

Finalmente, se incluye un conjunto de Anexos y Apéndices que amplían aspectos que son importantes para el desarrollo de esta Tesis, igualmente se incluye una semblanza del modelo de simulación empleado orientado a OMNeT++[4] como herramienta de simulación empleada.

Todos y cada uno de los aspectos incluidos en el presente documento, los Apéndices y respectivos anexos contribuyen al cumplimiento de los objetivos propuestos.

[4] *Extensible, modular, component-based C++ simulation library and framework, primarily for building network simulator*. www.omnetpp.org

Capítulo 1

Las Redes Ópticas

1.1. Introducción – Los sistemas de transporte ópticos

El modelo general de una red de comunicaciones se asimila en su diseño lógico a un grafo[5] compuesto por nodos y enlaces (Bertsekas 1998), en los nodos se llevan a cabo una serie de procesos entre los que se encuentran: la conmutación y el encaminamiento (o enrutamiento) de las unidades de información a través de la red, mientras que los enlaces realizan el transporte de dichas unidades a través de diferentes medios de transmisión hasta el siguiente nodo o hasta el nodo de destino. Igualmente, como puede verse en Kavian & Leeson (2012) y antes en Düser *et al.* (2000) existen distintos modelos de red propuestos que muestran áreas definidas dentro de una red denominadas área de acceso y área de transporte (también llamada *core* o *backbone area*), la primera se encarga de brindar las diferentes opciones de acceso a la red por parte de los usuarios del sistema de comunicaciones mediante el empleo de diferentes tecnologías (alambradas, inalámbricas y ópticas), mientras que la segunda agrupa los nodos y enlaces que transportan y distribuyen grandes volúmenes de tráfico entre los usuarios sin importar la distancia a la cual estos se encuentren. La figura 1.1 ilustra los aspectos antes mencionados enfocando su diseño hacia redes ópticas.

[5] Un grafo dirigido definido como **G = (N, A)**, consta de un conjunto de N nodos y un conjunto A de arcos.

Debido a que el ámbito general de la presente Tesis se enmarca en la redes de comunicaciones ópticas y como se han propuesto diferentes generaciones de evolución de estas redes, luego de una revisión bibliográfica al respecto se hace una semblanza del avance cronológico de estas infraestructuras destacando los aspectos más relevantes que han marcado cada generación.

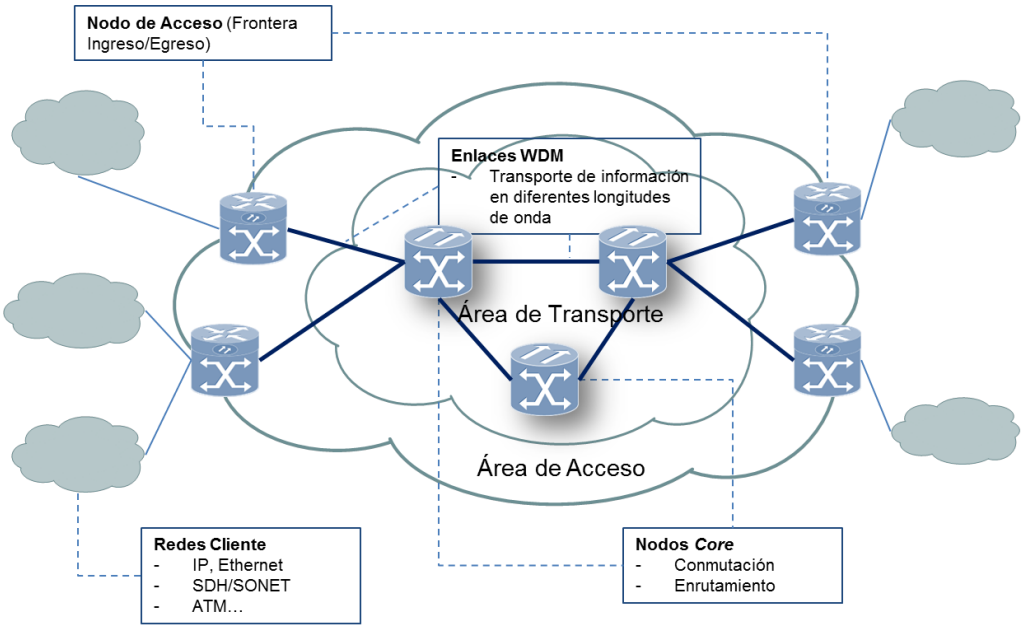


Figura 1.1. Modelo general de una red de comunicaciones ópticas

En principio las redes ópticas consistían en el reemplazo de los enlaces de cobre por fibras ópticas donde se utilizaba solo como medio de transporte e interconexión entre nodos electrónicos, posteriormente se comenzó a buscar la forma de explotar el ancho de banda mediante la introducción de técnicas de multiplexación.

La figura 1.2 muestra la evolución de las distintas metodologías de transporte óptico que emplean WDM discriminadas por generaciones (Jue & Vokkarane 2005). La **primera generación** corresponde a la instalación de enlaces por multiplexación de longitud de onda WDM (*Wavelength Division Mulplexing*) punto a punto (denominados sistemas WDM punto a punto) entre cada par de nodos (electrónicos) en la red, lo que implica que en cada nodo se debe realizar la conversión O/E/O (Óptico/Electrónico/Óptico) de la totalidad de la información transportada, esto es necesario ya que para procesar dicha información se debe convertir al dominio

electrónico y posteriormente se convierte en información óptica antes de ser reenviada. En esta configuración, los procesos de adicionar y extraer tráfico en cada nodo tienen un costo adicional debido al aumento en la complejidad de los conmutadores y en el procesamiento electrónico de la información, a la par se crean los denominados cuellos de botella electrónicos[6] (o *electronic bottlenecks*) que introducen retardos y una disminución evidente en el uso del ancho de banda disponible, tal como se menciona y analiza en Xiong, Vandenhoute & Cankaya (2000), Dhodhi, Tariq & Saleh (2001) y Kan *et al.* (2002). Para disminuir el costo de la red se propone que los dispositivos empleados en la construcción de los nodos de la red sean completamente ópticos.

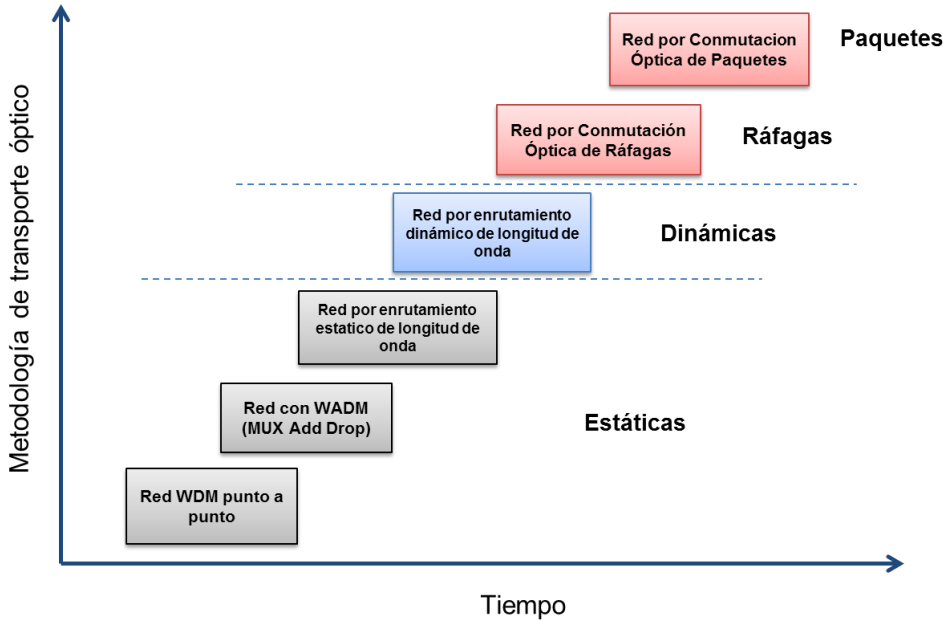


Figura 1.2. Evolución de las metodologías de transporte óptico con WDM (Vokkarane 2005)

La **segunda generación** de redes ópticas se basa en la introducción de equipos multiplexores de adición y extracción de longitudes de onda o WADM (*Wavelength Add-Drop Multiplexers*). Estas estructuras debido a la flexibilidad de su diseño se emplean inicialmente en la construcción de redes ópticas en anillo de área

[6] Igualmente, se presentan cuellos de botella ópticos debido a la naturaleza de la fibra y los distintos efectos lineales y no lineales presentes en el medio físico. Kaminov, Li & Wilner (2008 capitulo 7).

metropolitana (Mukherjee 1997). Un aspecto de importancia es que se logra incorporar funciones de conmutación y enrutamiento en los dispositivos electrónicos dentro de la red óptica, la unidad básica es el *lightpath* que se introduce en las redes SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) ante el incremento en el tráfico transportado por estas redes.

Asimismo, cuando se trata de construir redes en malla las cuales constan de enlaces de fibra multi-lambdas se requiere de dispositivos de red adecuados para la interconexión de las fibras ópticas. La **tercera generación** de arquitecturas de redes ópticas está basada en dispositivos de interconexión completamente ópticos. Estos dispositivos se agrupan en tres categorías denominadas acopladores pasivos en estrella, enrutadores pasivos y conmutadores activos. De las tres categorías mencionadas, solo los conmutadores activos pueden encaminar longitudes de onda de un conjunto de fibras de entrada a uno de salida, además de soportar comunicaciones simultáneas y que pueden ser configurados con diferentes patrones de interconexión. En esta tercera generación de redes ópticas, se pueden transportar los datos sin realizar conversiones O/E/O mediante acciones *by-pass* lográndose reducción de costos y retardos (Jue & Vokkarane 2005).

Aunque se busca obtener estructuras de red completamente ópticas, en la actualidad se cuenta principalmente con redes por conmutación de circuitos con conexiones estáticas, lo cual no permite acomodarse adecuadamente a la naturaleza en ráfagas del tráfico Internet. Idealmente, para proveer un mejor aprovechamiento del núcleo se propone el empleo de conmutación de paquetes en el nivel óptico aunque esta tecnología presenta restricciones tecnológicas para el almacenamiento de fotones lo cual la hace inviable en corto tiempo.

Una alternativa intermedia a la conmutación óptica de circuitos y de paquetes es la conmutación óptica de ráfagas OBS (*Optical Burst Switching*) según Qiao & Yoo (1999) y Xu, Perros & Rouskas (2001), en esta tecnología los paquetes se concatenan en unidades de transporte denominadas ráfagas (*bursts*) la cuales se conmutan en forma completamente ópticas a través de la red. Las redes con tecnología OBS facilitan la multiplexación estadística y el transporte de tráfico Internet además en principio no presentan limitaciones tecnológicas para su implantación, estos aspectos hacen que supere en muchos aspectos a la

conmutación óptica de circuitos y de paquetes. En secciones posteriores se estudia con mayor detalle cada una de las técnicas de conmutación óptica, centrando la atención en OBS como elemento esencial en el desarrollo de la Tesis.

En las secciones siguientes se amplía los conceptos sobre redes ópticas, que representan mayor relevancia para el cumplimiento de los objetivos de esta Tesis.

1.2. Aspectos básicos de las redes ópticas

Las redes ópticas tienen su origen a mediados del siglo XIX con el desarrollo de las comunicaciones mediante el empleo del espectro de luz a largas distancias pero fue solo hasta 1961, con la invención del LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) el cual presenta características idóneas para ser transmitido por medio de una fibra óptica, cuando comenzó el desarrollo de sistemas de comunicación por fibra óptica logrando grandes avances como la disminución de los efectos lineales (atenuación y dispersión) sobre los enlaces de fibra, igualmente, se logró transmitir diferentes longitudes de onda sobre una misma fibra a lo que se denominó WDM o Multiplexación por División de Longitud de Onda, aspecto fundamental en el desarrollo de los sistemas de larga distancia, a estos avances se suma la fabricación de diferentes tipos de fibras ópticas, el desarrollo de distintos formatos de modulación aplicables en los enlaces físicos (además del tradicional NRZ-OOK *Non Return to Zero – On/Off Keying*), el desarrollo de amplificadores ópticos tipo EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) y RAMAN[7] permitiendo el despliegue de enlaces por fibra óptica de miles de kilómetros (cables submarinos intercontinentales) y terrestres de larga distancia (*Long-Haul backbones*), con estos avances no tarda la ITU (*International Telecommunication Union*) en proceder a desarrollar los estándares para esta tecnología. El desarrollo con mayor detalle de estos conceptos se encuentra en el compendio realizado por Kaminov, Li & Willner (2008).

Una vez se han implantado soluciones con sistemas de comunicación por fibra óptica, se comprueba como la transmisión de información mediante el empleo de fibra óptica presenta una serie de ventajas sobre otras tecnologías (Durán 2008),

[7] Llamado así en honor al físico de la india Chandrasekhara Raman por su trabajo sobre “Difracción Molecular de la Luz” y el descubrimiento de la radiación o efecto Raman.

entre las que cabe mencionar: elevado ancho de banda (50 Tbps), baja tasa de error de bit, baja atenuación de la señal (menor de 0.2dB/km), baja disipación de energía, insensibilidad a interferencias electromagnéticas, poco peso y alta seguridad.

Asimismo, el empleo de la fibra óptica ha favorecido el desarrollo de tecnologías como la Jerarquía Digital Sincrónica SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) y la Red Óptica Sincrónica SONET (*Synchronous Optical Network*), conocidas en conjunto como tecnologías soporte de la red de transporte óptico OTN *(Optical Transport Network*) y convertidas en estándares tanto en Estados Unidos como en el resto del mundo, ambas opciones se basan en el concepto de sincronismo maestro/esclavo mediante el empleo de relojes atómicos, lo que permite que la información sea transmitida en forma de tramas sincrónicas con diferentes capacidades de transporte. En SDH (estandarizada por la UIT-T en la recomendación G.708ss) las tramas son denominadas Módulos de Transporte Sincrónico STM (*Synchronous Transport Module*) y sus capacidades van desde el STM_1 a 155,52Mbps hasta el STM_256 cerca de 40Gbps. En el caso de SONET (estandarizada por la ANSI en T1.105 y T1.106) se emplean elementos denominados Señales de Transporte Sincrónicas o STS (*Synchronous Transport Signal*) o también denominadas portadoras ópticas OC (*Optical Carrier*) que van desde el STS_1 a 51,84Mbps hasta el STS_768 a 40Gbps (y con potencial de 100Gbps).

Como se puede observar, estas tecnologías en principio desarrollan procesos de transmisión de información sobre enlaces ópticos aunque el procesado de la información se hace en el dominio electrónico. Sus nodos están compuestos por multiplexores, los cuales pueden programarse como multiplexores de adición y extracción de información ADM (*Add/Drop Multiplexer*) y/o transconectores digitales DXC (*Digital Cross Connector*) los cuales tienen operación en el dominio electrónico y emplean la técnica de multiplexación por división de tiempo TDM (*Time Division Multiplexing*), (Maier 2008). Esto último implica que la comunicación se basa en la transmisión de información con velocidad de bit constante CBR (*Constant Bit Rate*) aspecto valido en redes de transporte principalmente de voz digitalizada. Su operación por conmutación de circuitos orientados a conexión se considera muy confiable y eficiente. Sin embargo uno de los inconvenientes que evidencian estas tecnologías radica en el hecho de necesitar la inclusión de conversores O/E y E/O en el recorrido de los enlaces físicos ya sea para regenerar la información o en los

nodos propios de la red (ADM y DXC), lo que conlleva a que se presenten cuellos de botella (*botlenecks*), como se anotaba anteriormente, los cuales además incrementan los retardos e influyen sobre el desempeño en general del sistema.

Con la tendencia hacia el despliegue de redes por conmutación de paquetes, en particular las redes IP céntricas, se hace necesario emplear tecnologías que puedan soportar tráfico en ráfagas o con velocidad de bit variable VBR (*Variable Bit Rate*), en la cual se consideren las características propias de los paquetes como la longitud variable, no orientados a conexión, sin acuse de recibo, aspectos que constituyen la naturaleza auto similar del tráfico en Internet (Leland *et al.* 1994).

De otro lado la arquitectura de los enrutadores IP electrónicos no son lo suficientemente escalables y presentan limitaciones tecnológicas cuando se trata de procesar información a velocidades del orden de los Terabits por segundo (Papadimitriou, Papazoglou & Pomportsis 2006), es decir que cuando se requiere mayor capacidad de procesamiento se necesita aumentar la densidad de integración electrónica lo que causa la aparición de capacitancias parasitas no deseadas, igualmente, se dispara el consumo de potencia y la disipación de calor (Klinkowski 2007).

En resumen, el ancho de banda ofrecido por la tecnología óptica es muy elevado (Tbps), pero las limitaciones aparecen por la tecnología electrónica involucrada en el proceso de transmisión, siendo esta velocidad muy superior a la velocidad del procesamiento electrónico actual. Para aprovechar esta gran capacidad se puede dividir todo el ancho de banda en canales o bandas más pequeñas y utilizar estos canales concurrentemente (Durán 2008, pp. 10-12). De hecho, y como se verá en seguida, la anchura de los canales ópticos está especificada por la ITU en la norma ITU-T G.694.1.

Como se ha expresado anteriormente, uno de los métodos más empleados en las comunicaciones por fibra óptica es la multiplexación por división de longitud de onda o WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) ya que el equipo electrónico debe operar a la tasa de transmisión de un canal que puede ser elegido arbitrariamente. Esta tecnología constituye una verdadera revolución en el uso de los sistemas por fibra óptica para la transmisión de datos, donde cada señal a transmitir modula un láser

que emite a una longitud de onda especifica la cual se envía a través de la fibra óptica (Maier 2008, pp.7-10).

Es así como con el desarrollo de la técnica WDM se despliegan sistemas que utilizan longitudes de onda en el espectro infrarrojo principalmente, logrando enviar diferentes longitudes de onda por una fibra en formatos denso o DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) y espaciado o CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*) respectivamente, cada uno de los formatos tiene su campo de aplicación. Lo anterior depende de la distribución que se hace del espectro óptico, las figura 1.3 y 1.4 ilustran estos dos conceptos desde la perspectiva de la ITU-T haciendo énfasis en la curva de atenuación (medida en decibeles por kilómetro *dB/km*) versus longitud de onda (medida en nanómetros nm) sobre la cual se trazan las bandas de frecuencia.

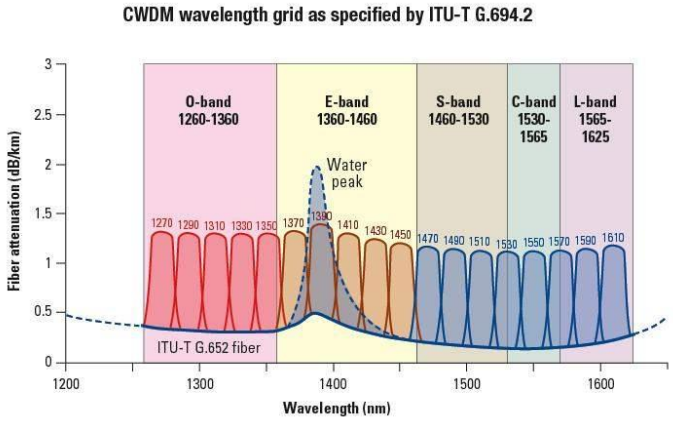


Figura 1.3. Bandas del espectro óptico y la ubicación de las longitudes de onda para CWDM según ITU-T

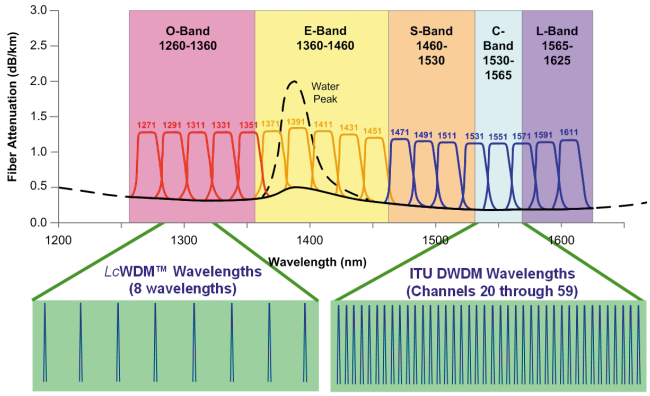


Figura 1.4. Bandas del espectro óptico y la ubicación de las longitudes de onda para DWDM según ITU-T

El espectro óptico se divide en tres ventanas, una primera ventana que se define entre los 800 y 900nm utilizada como ventana de transmisión en los primeros sistemas de comunicaciones por fibra óptica, una segunda ventana alrededor de 1300nm para sistemas más modernos y una tercera ventana entre 1500 y 1600nm siendo esta última donde se han desarrollado los sistemas DWDM y los amplificadores ópticos tipo EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*), la figura 1.5 a), b) y c) muestran la distribución de longitudes de onda por ventana e ilustra las diferentes bandas de transmisión en su orden O, E, S, C, L, U (Ramaswami, Sivarajan & Sasaki 2010).

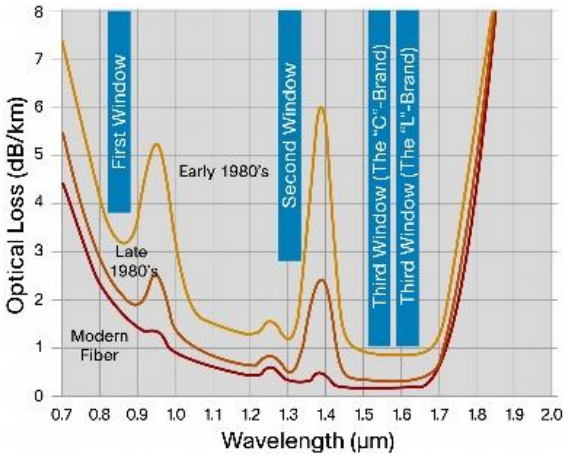
Nominal spectrum (nm)	Fiber Types		
	Window	Multimode (MM)	Single Mode (SM)
850 ± 30 (short wavelength)	I	X	
1300 ± 30 (long wavelength)	II	X	X
1550 ± 30 (extra-long wavelength)	III		X

a) Estándar de Facto

ITU-T G.652 : α<0.5dB/Km @1300nm, <0.4dB/Km @1500nm

Banda	Descriptor	Rango (nm)
O	Original	1.260 - 1360
E	Extended	1.360 – 1.460
S	Short Wavelength	1.460 – 1.530
C	Conventional	1.530 – 1.565
L	Long Wavelength	1.565 – 1.625
U	Ultra-long Wavelength	1.625 – 1.675

b) Bandas de Frecuencia



b) Ventanas

Figura 1.5. Rangos de las ventanas y bandas de transmisión en los sistemas de transmisión ópticos (Jachetta 2013)

Con los elementos teóricos mencionados se han cubierto aspectos esenciales sobre la funcionalidad de un sistema de telecomunicaciones ópticas en lo relacionado con

el espectro infrarrojo, las ventanas de transmisión y las diferentes bandas empleadas con sus respectivos grupos de longitudes de onda disponibles para transmisión de información. En seguida como parte del proceso de ambientación sobre la infraestructura física de los sistemas ópticos, se aborda lo relacionado con los componentes básicos a nivel físico de estos sistemas.

En general un sistema de comunicación por fibra óptica consta de un transmisor compuesto por un generador de tráfico, un láser (de onda continua por ejemplo), un modulador (por ejemplo de tipo Mach Zehnder), uno o varios trayectos de fibra óptica de diferentes características (ejemplo la fibra estándar SSMF28[8]), elementos de amplificación (RAMAN o EDFA) y el receptor compuesto por elementos de detección óptica (tipo diodos PIN), filtros ópticos y filtros electrónicos además de los elementos de recepción de la información de usuario.

La figura 1.6 ilustra un enlace a nivel físico por fibra óptica empleando la técnica DWDM para n canales (λ_1 a λ_N), en él se destacan los principales componentes como son transmisores, receptores, multiplexores y demultiplexores, filtros, amplificadores, entre otros. Igualmente, la figura 1.7 ilustra un modelo de simulación en la herramienta optsim™ de *synopsis* de un enlace DWDM para cuatro canales.

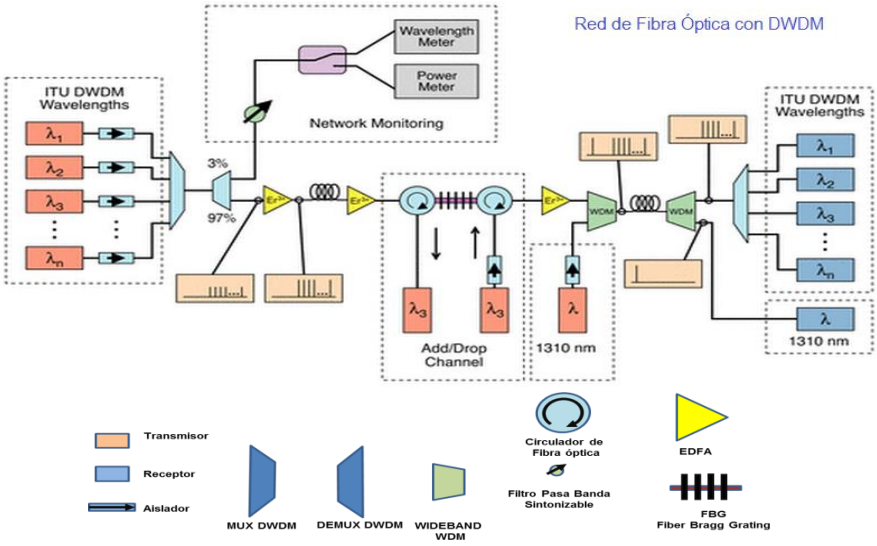


Figura 1.6. Modelo de enlace físico DWDM destacando sus componentes

[8] *Standard Single Mode Fiber*28 de la empresa Corning® cumple con las recomendaciones ITU-T G.652D y es de gran uso. http://www.corning.com/opticalfiber/products/ultra_fiber.aspx

La preocupación actual sobre estos sistemas de comunicación se enfoca principalmente en aprovechar al máximo el espectro óptico disponible (aumento de la densidad de información de bit), la disminución de los efectos lineales y no lineales sobre la fibra (ver tabla 1.1) y la disminución de las conversiones O/E/O lo que implica aumentar el proceso información en el dominio óptico y menos en el electrónico, la disminución de costos de instalación y mantenimiento, una gestión de la red integrada, entre otros aspectos.

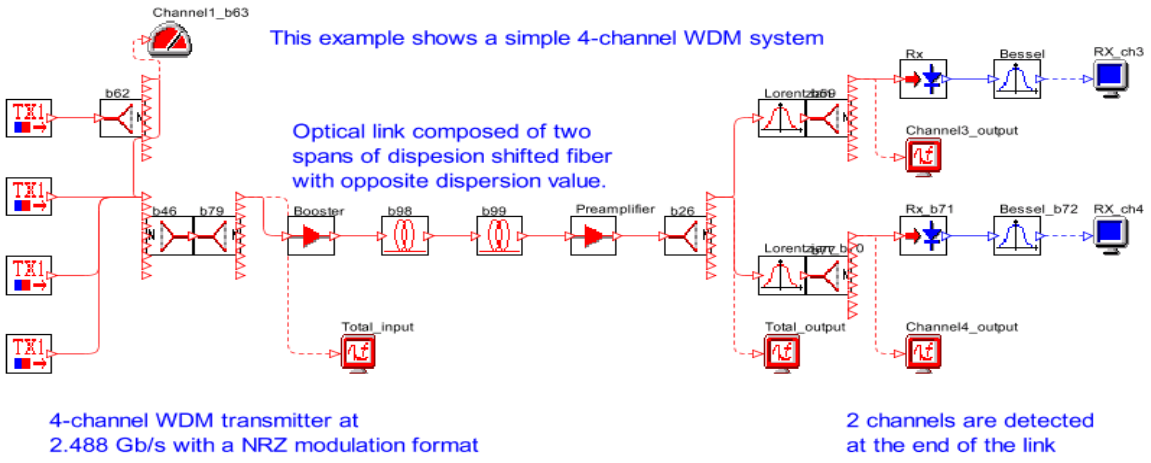


Figura 1.7. Modelo de simulación de un sistema DWDM en OptSim™[9] de synopsys

Actualmente se continua explorando sobre la construcción de nuevos tipos de fibra óptica (como las fibras de cristal fotónico y fibras multinucleadas), igualmente, se adelantan investigaciones sobre nuevas técnicas de multiplexación (por división espacial y por división de modo), la figura 1.8 ilustra lo antes expuesto en Morioka (2009) y Morioka *et al.* (2012).

Efectos o características Lineales	**Efectos o Características No lineales**
Atenuación (α [dB/Km])	Modulación por fase cruzada (XPM *Cross-Phase Modulation*)
Dispersión Cromática (CD *Chromatic Dispersion* [ps/nm*km])	Mezcla de cuarta onda (FWM *Four Wave Mixing*)
Dispersión por Modo de Polarización (PMD –	Modulación de Auto fase (SPM *Self-Phase*

[9] Herramienta de simulación de sistemas de comunicación por fibra óptica de uso académico e industrial.

Polarization Mode Dispersion [ps/√km])	*Modulation*)
	Emisión o esparcimiento Estimulado de Raman (SRS *Stimulated Raman Scattering*)
	Emisión o esparcimiento estimulado de Brillouin (SBS *Stimulated Brillouin Scattering*) según Damzen & Vlad (2003)

Tabla 1.1. Resumen de características lineales y no lineales que presentan los sistemas de comunicación por fibra óptica

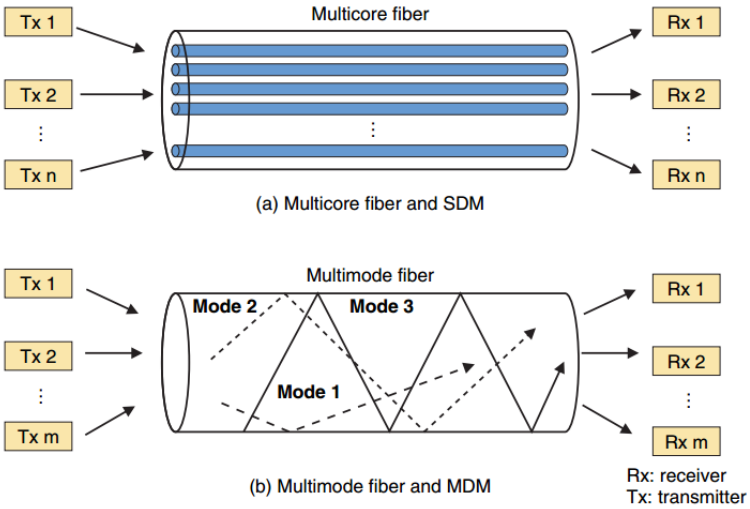


Figura 1.8. Nuevas fibras y tecnologías de multiplexación (Morioka *et al.* 2012)

Igualmente, en Morioka *et al.* (2012) se propone la iniciativa de desarrollar redes con caminos ópticos elásticos, lo que implica la asignación del espectro óptico en forma adaptativa, lo que podría evitar el desperdicio de ancho de banda aumentando la capacidad de la red.

1.3. Evolución de las redes WDM

Además de los aspectos mencionados sobre WDM en la sección anterior, se puede agregar que esta clase de redes ópticas emergen como la tecnología de transporte (*core*) tipo *backbone* para las redes IP de próxima generación, en resumen sus principales características son:

- Proveen gran ancho de banda al nivel físico con la habilidad de soportar cientos de canales de diferentes longitudes de onda en una sola fibra, esto implica convertir una fibra real en múltiples “fibras virtuales” como lo expresa Sasaki & Gerstel (2000). Se cuenta con reportes de sistemas de prueba de varios Terabits por segundo empleando formatos de modulación como variantes de Modulación de Amplitud en Cuadratura o QAM (Silva *et al.* 2013). Esto obliga a contar con protocolos y arquitecturas en los niveles altos para aprovechar este ancho de banda (Jue & Vokkarane 2005).

- Como se anotaba anteriormente, los sistemas WDM se pueden clasificar como densos y espaciados referidos como CWDM y DWDM respectivamente, esto depende del espaciamiento entre longitudes de onda y el cumplimiento de los estándares propuestos por la ITU. Como se expresa en DeCusatis (2001), otras generaciones de sistemas DWDM pueden soportar más longitudes de onda y de esta manera más canales sobre una misma fibra óptica. Desde hace unos años muchas empresas han anunciado la utilización de miles de longitudes de onda por fibra, lo cual puede ser alcanzado mediante la combinación de las bandas C y L con espaciamientos de alrededor de 0.2nm.

- Estas redes pueden ser transparentes o no (redes opacas), lo que implica que las señales pueden tener o no conversión O/E/O en cada nodo (Green 1993). En el caso de las redes opacas se utilizan los dominios ópticos y eléctricos, mientras que las transparentes emplean mayormente el dominio óptico, a estas últimas redes también se les denomina redes completamente ópticas ya que la información que se transmite extremo a extremo permanece todo el tiempo en el dominio óptico (Maier 2008).

- Las redes WDM pueden ser estáticas o dinámicas dependiendo de la forma como se establecen las conexiones dependiendo de los requerimientos de conexión existentes, en una red estática las conexiones entre nodos se establecen de manera permanente y por lo tanto la configuración de los nodos ópticos no cambia, mientras que en las redes WDM dinámicas, las conexiones se establecen solo cuando existe información para ser transmitida (Leiva *et al.* 2011).

- WDM introduce gran flexibilidad a la red ya que cualquier longitud de onda puede ser extraída o adicionada en cualquier nodo intermedio (ADM) entre un transmisor y un receptor sin afectar las otras longitudes de onda. Igualmente, un nodo intermedio puede encaminar cualquier longitud de onda a un destino específico con la ayuda de un enrutador óptico.

Tomando como base lo definido al comienzo del presente capítulo, respecto a la evolución de los sistemas de transporte ópticos, dentro de las redes ópticas basadas en WDM se pueden encontrar sistemas WDM implementados en muchas de las redes de transporte actuales, se trata principalmente de enlaces WDM punto a punto donde gracias a la multiplexación de longitudes de onda se logra aumentar la capacidad de transmisión entre nodos (o enrutadores) adyacentes, en cada nodo la totalidad de los paquetes IP son convertidos del dominio óptico al dominio electrónico para ser procesados. A la salida de cada nodo los paquetes son convertidos de nuevo al dominio óptico y se transmiten por las fibras ópticas de salida, esta operación se repite hasta alcanzar el nodo destino. A este grupo pertenecen las redes SDH/SONET soportadas sobre WDM dando origen a las redes de área metropolitana MAN (*Metropolitan Area Network*) caracterizadas principalmente por su alcance, por lo que la transmisión de datos no presenta requisitos muy exigentes comparados con las redes de larga distancia o redes de amplia cobertura o *Long Haul*.

Como se anotaba anteriormente debido a que el procesamiento electrónico es más lento que la velocidad de transmisión óptica, la conversión O/E/O de la totalidad de la información transmitida desde el origen hasta el destino crea sobrecarga para el sistema, especialmente cuando la mayoría del tráfico que se cursa es de tipo *by-pass*. Para resolver estos problemas se han propuesto diferentes alternativas entre las cuales se incluyen algunas que buscan evitar el procesamiento de información en los nodos intermedios o también realizar el procesado de la información en el dominio completamente óptico.

Dentro de un segundo grupo de redes ópticas están las basadas principalmente en DWDM (en la cual las fibras pueden incluir cientos y hasta miles longitudes de onda) lo cual brinda el soporte ideal para redes MAN y WAN donde las longitudes de onda no solo permiten incrementar el ancho de banda, sino que se emplean para realizar

procesos de encaminamiento a través de la red. La unidad fundamental de esta generación de redes son los caminos de luz o *lightpaths* los cuales consisten en un circuito óptico establecido entre dos nodos de la red (no necesariamente adyacentes) sin que sea necesario el procesado electrónico en los nodos intermedios (Durán 2008), lo anterior permite que la mayor carga de información se presente en los nodos origen y destino, permitiendo un mejor flujo de datos en los nodos intermedios reduciendo considerablemente los cuellos de botella antes mencionados. Las redes que pertenecen a este grupo son aquellas que realizan el enrutamiento o encaminamiento por longitud de onda o denominadas redes WRON (*Wavelength Routed Optical Networks*), en estas redes el establecimiento de los caminos de luz puede hacerse de forma estática o dinámica, como ejemplo están las redes ópticas por conmutación de circuitos, paquetes y ráfagas. En una sección posterior se trata en detalle cada una de estas arquitecturas de conmutación óptica.

Una de las ventajas que aporta la multiplexación por longitud de onda en las redes ópticas es que permite el desarrollo de un nivel de transporte completamente óptico donde se puede realizar más o menos procesado electrónico de información dependiendo de la arquitectura de conmutación seleccionada. El contar con una capa completamente óptica permite:

- Mantener la independencia entre longitudes de onda, es decir que la señal que se transporta en una longitud de onda es completamente independiente de la señal que se lleva en otra longitud de onda sobre la misma fibra óptica.

- Reutilización de las longitudes de onda, lo que implica que la misma longitud de onda puede transportar señales diferentes en lugares diferentes de la misma red.

- Transparencia, esta capa es independiente del formato de modulación empleado en el nivel físico.

- Se puede dotar a la red de sistemas de protección y recuperación ante fallos lo que permite tener una red más robusta.

Farahmand (2005) de su documento de tesis doctoral se reproduce la Tabla 1.2 en la cual se muestra un resumen de las diferentes características que presentan las redes WDM considerando distintos escenarios de evolución.

Generación	Primera	Segunda	OBS	OPS
Componentes	ADM	WADM	OXC	OXC/WLC
Topología típica	P2P WDM	Malla/Anillo	Malla/Anillo	Malla
Capacidad	10-100 Gbps	100 Gbps - Tbps	100 Tbps	Pbps
Tipo de red	Opaca	Opaco/transparente	Transparente	Transparente
Tipo de conmutador	Opaco	Opaco/Transparente	Transparente	Transparente
Tipo de tráfico	Estático	Basado en *lightpath* Estático/dinámico	Basado en ráfagas Dinámico	Basado en paquetes Dinámico

Tabla 1.2. Resumen de Evolución de WDM (Farahmand 2005)

- **Evolución de la capa óptica**

A nivel físico es posible implementar una capa completamente óptica con el desarrollo de tres elementos claves: el terminador de línea óptico OLT (*Optical Line Terminator*), el Multiplexor óptico de adición y extracción OADM (*Optical ADM*) el cual se encarga de adicionar o extraer selectivamente de un flujo de longitudes de onda algunas de ellas antes de que dicho flujo sea enviado al siguiente nodo, el mecanismo de *Grating* o rejillas de Bragg es muy empleado para implementar esta funcionalidad. El siguiente componente es el transconector óptico OXC (*Optical Cross Connector*) o ROADM[10] el cual cuenta con múltiples puertos de entrada y de salida, se encarga de conmutar cualquier puerto de entrada con cualquier puerto de salida. Estos dispositivos tienen la capacidad de conversión de longitud de onda y la posibilidad de conmutar completamente flujos de datos en el dominio óptico.

[10] Comercialmente se han definido cuatro tipos principales de ROADM denominados: ROADM tipo 1 con puertos fijos, tipo 2 pueden enviar cualquier lambda a cualquier puerto, el conmutador selectivo de longitud de onda WSS (*Wavelength Selective Switch*) múltiples lambdas a cualquier puerto y OXC múltiples lambdas desde cualquier entrada a cualquier salida Enablence (2010).

Sin embargo, la principal limitación de esta tecnología es su granularidad, ya que ofrece conexiones ópticas con unos anchos de banda concretos, que equivalen a una longitud de onda, típicamente 10 Gbps, 40 Gbps o incluso 100 Gbps. De hecho, como se anotaba anteriormente, la anchura de los canales ópticos está especificada por el organismo ITU G.694.1. La granularidad mayor (conexiones de diferentes anchos de banda), y la agregación (combinación de conexiones de menor velocidad en una de mayor velocidad) se proporcionan típicamente mediante tecnología electrónica, que adolece de los problemas de escalabilidad mencionados anteriormente.

Sin embargo, según Zheng & Mouftah (2003) con estos elementos es posible definir una arquitectura para soporte de Internet óptica de próxima generación (Yousefizadeh, Zilouchian & Ilyas 2003) la cual estaría compuesta por dos partes funcionales a saber: un núcleo y múltiples redes de acceso, estas últimas se encargan de recolectar el trafico IP de los usuarios finales (desde redes tipo Gigabit Ethernet o redes ópticas pasivas PON (*Passive Optical Networks*) con accesos de fibra a diferentes distancias y hasta el hogar del abonado denominadas técnicas FTTx (*Fiber To The x*)), estas se conectan al núcleo de la red mediante nodos de frontera (o *edge nodes*) de alta velocidad. En general un nodo de ingreso agrega tráfico hacia un mismo nodo de destino o egreso y lo reenvía a través del núcleo de la red el cual consta de elementos ópticos reconfigurables (OADM y OXC) interconectados por enlaces ópticos de largo alcance y alta capacidad tipo WDM.

Como se puede apreciar, en la actualidad aún no se cuenta con redes completamente ópticas y operando en ambientes reales. Es por ello que este escenario de migración incluye soluciones intermedias de redes ópticas como SDH de próxima generación NG-SDH (*Next Generation* SDH), redes OBS con encaminamiento por longitud de onda WROBS (*Wavelength Routed Optical Burst Switching*), redes ópticas por conmutación automática ASON (*Automatic switched optical networks*), ITU-T G.709, entre otros desarrollos.

En seguida se hace una descripción con cierto grado de detalle sobre las diferentes tecnologías que constituyen las redes por conmutación óptica de información con es el caso de OCS, OPS (a la cual se le dedica una sección especial) y OBS. Posteriormente el Capítulo 2 del presente documento se enfoca únicamente hacia las

redes por conmutación óptica de ráfagas OBS (*Optical Burst Switching*) como elemento central de la Tesis.

1.4. Arquitecturas por Conmutación Óptica

Como se describe en Maier (2008, pp. 19-23) las redes ópticas se presentan en diferentes “sabores”, éstas pueden tener distintas topologías (en mayor escala en malla y anillo), pueden ser opacas o transparentes y pueden estar basadas en distintos esquemas de multiplexación (TDM, SDM y/o WDM). A nivel físico pueden incluir elementos sintonizables como transmisores, filtros y convertidores de longitudes de onda TWC (*Tunable Wavelengths Converters*). Igualmente, para mejorar la flexibilidad de las redes ópticas pueden hacer uso de ROADMs. El término redes por conmutación óptica se refiere a los tipos de redes que son flexibles y reconfigurables que pueden emplear las técnicas de multiplexación, de sintonía y conmutación antes mencionadas en el dominio óptico principalmente. Además de anota que estas redes pueden ser desarrolladas en cualquier cobertura (local, acceso, metropolitana y área extensa).

Klinkowski (2007), muestra como las redes ópticas adoptan distintos modelos de conmutación que han sido desarrollados con éxito en redes electrónicas. Es así como la conmutación de circuitos ha sido empleada en las redes de voz por muchos años donde los enlaces entre usuarios se establecen previamente creando circuitos de voz dedicados los cuales permanecen durante toda la comunicación y son liberados al terminar la misma. Este modelo se asumió desde hace más de dos décadas como una opción para las redes ópticas donde se propone la conmutación óptica de circuitos OCS (*Optical Circuit Switching*), paradigma que permanece en muchas redes de transporte en la actualidad. Chlamtac Ganz, & Karmi (1992) presenta las bases de las redes OCS y un estudio de las comunicaciones empleando caminos de luz o *lightpaths*.

Igualmente, las redes de datos aplican el paradigma de la conmutación de paquetes, esta forma de comunicación divide la información a transmitir en pequeñas unidades de datos denominadas **paquetes** los cuales pueden ser almacenados en los nodos y enviados por enlaces que pueden estar compartidos por otros tipos de tráfico (mecanismo *store and forward*), este modelo permite la creación de circuitos virtuales

VC (*Virtual Circuits*) o conexiones lógicas que pueden ser permanentes PVC (*Permanent Virtual Circuits*) y conmutados SVC (*Switched Virtual Circuits*), como se describe en Spohn (1997 cap18). Este modelo dio origen a la propuesta de la tecnología de red por conmutación óptica de paquetes OPS (*Optical Packet Switching*) descrito en Chiaroni (2001).

Igualmente, el concepto de conmutación de ráfagas fue empleado inicialmente en redes por modo de transferencia asincrónica ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) técnica propuesta por la Unión Internacional de Telecomunicaciones ITU-T en la recomendaciones de la serie I (I.300ss). Este modelo permite el envío de un grupo de paquetes o celdas (unidades de datos de 53 bytes de longitud) las cuales llevan un encabezamiento que puede ser procesado en los nodos y de esta forma configurar el conmutador para que la ráfaga de datos pueda encontrar una salida y continuar al siguiente nodo (Spohn 1997, pp. 527-533). Este modelo fue adoptado para el desarrollo de la propuesta OBS (*Optical Burst Switching*) hecha por Qiao & Yoo (1999).

En general, las redes ópticas pueden soportar aplicaciones con manejo crítico de latencias como televisión *broadcast*, juegos interactivos, video conferencia, telemedicina y teletrabajo. Igualmente aplicaciones de alto *throughput* como video bajo demanda, programas de compartición y descarga de archivos. También están los servicios orientados a conexión y los servicios sin conexión, a estos últimos pertenece la suite de protocolos TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) de gran auge y con la cual interactúa el modelo de red OBS desarrollado en esta Tesis.

1.4.1. Principio de Operación

Un aspecto muy importante dentro de la operación de las redes ópticas es la granularidad en la conmutación (Finn, Medard & Barry 1997), este aspecto se refiere a la forma como se realizan las conexiones entre fuente y destino, la tabla 1.3 presenta una lista de las diferentes opciones de granularidad desde la más espaciada hasta la más fina.

Cada una de estas opciones tiene innumerables escritos entre libros, artículos y resultados de trabajos de investigación, debido al interés que significa para este trabajo en seguida se hace una descripción de OCS y OPS. Finalmente, se describe a profundidad la técnica OBS ya que es sobre este el tipo especial que se desarrolla la presente Tesis.

Clases de Granularidad en la conmutación
Conmutación de fibras – *Fiber Switching*
Conmutación por banda de frecuencias – *Waveband switching*
Conmutación por longitud de onda – *Wavelength switching*
Conmutación por sub lambda – *Subwavelength switching*
Conmutación óptica de circuitos – *Optical Circuit Switching*
Conmutación óptica de ráfagas – *Optical Burst Switching*
Conmutación óptica de paquetes – *Optical Packet Switching*

Tabla 1.3. Granularidad en la conmutación en redes ópticas (Maier 2008, pp. 24)

1.4.2. Conmutación Óptica de Circuitos OCS (*Optical Circuit Switching*)

También conocidas como redes WR (*Wavelength Routing*), este tipo de redes operan orientadas a conexión, la transmisión de datos desde el origen hasta el destino se realiza sobre *lightpaths* previamente establecidos. El establecimiento de un lightpath incluye las tareas de descubrir la topología y los recursos, enrutamiento, asignación de longitudes de onda, señalización y reserva de recursos (Jue & Vokkarane 2005, pp.7). Un *lightpath*[11] puede usar la misma longitud de onda para todos los enlaces que componen una ruta definida, esta funcionalidad se conoce como restricción de continuidad en la longitud de onda WCC (*Wavelength Continuity Constraint*), sin embargo, si se cuenta con conversores de longitudes de onda WC (*Wavelength Converter*), el *lightpath* puede ser convertido desde una longitud de onda a otra en un nodo intermedio. Igualmente, una longitud de onda puede ser usada para múltiples *ligthpaths* a lo largo de una ruta, esta característica permite la reutilización de las longitudes de onda (*wavelength reuse*) lo cual hace escalable y eficiente en costos a una red WR.

[11] En adelante se utilizaran: el término en ingles *lightpath* y la frase “camino de luz” indistintamente.

Como se ha dicho con anterioridad, los nodos que componen una red OCS se denominan OXC, como el mostrado en la figura 1.9, cada uno de ellos es responsable de la conmutación completamente óptica que para este caso consiste en llevar los datos desde una longitud de onda de un puerto de entrada hasta una longitud de onda en un puerto de salida. En su funcionalidad un OXC puede contener los siguientes bloques (1) conmutación de fibras, lo que permite encaminar todas las longitudes de inda de una fibra de entrada a una de salida (diferente a la de entrada) los que se conoce como una conmutación de tipo espacial; (2) conmutación de longitud de onda, conmuta longitudes de onda específicas desde una fibra de entrada hacia múltiples fibras de salida (multiplexación o demultiplexación); y (3) conversión de longitudes de onda, toma longitudes de onda entrantes y las convierte a otra frecuencia óptica de salida. En estas redes la duración de una conexión se espera que sea del orden los segundos y las fases de establecimiento y liberación de recursos puede ser del orden los milisegundos.

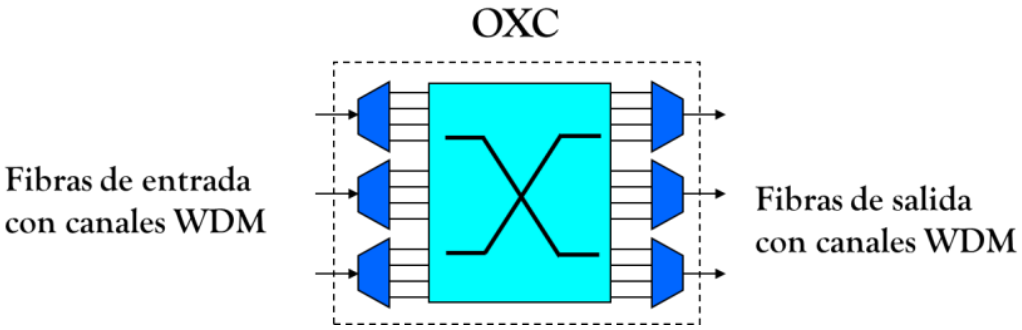


Figura 1.9. Esquema general de un nodo OXC

La figura 1.10 muestra el modelo general de una red OCS en ella se destacan los elementos que la componen.

Tal como se ha mencionado, el establecimiento de un camino de luz involucra diferentes fases como el descubrir la topología y los recursos disponibles, encaminamiento y asignación de longitud de onda RWA (*Routing and Wavelength Assignment*)[12], señalización y reserva de recursos. Mantener cierta información sobre el estado de la red es el objetivo central del proceso mencionado inicialmente, esta información incluye la topología de red física y la disponibilidad de ancho de banda

[12] Este problema se analiza en un ítem especial debido a su gran importancia en el diseño de redes ópticas.

en los enlaces de la red. En las redes WR el conocer la disponibilidad de longitudes de onda en un enlace en particular es un aspecto esencial.

Asimismo, el establecimiento de los *lightpaths* puede ser estático o dinámico, en el primero el principal objetivo es minimizar los recursos consumidos tales como el número de longitudes de onda o fibras empleadas en la red. Es decir, el encaminamiento y asignación de longitudes de onda se hace con base en la topología física y los caminos de luz establecidos, de esta forma se determinan la mejor ruta para cada *lightpath* para minimizar el uso de las longitudes de onda.

Para el caso del establecimiento de *ligthpaths* de tipo dinámico, se debe establecer un camino de luz para cada requerimiento de conexión que se presente, el cual se libera posteriormente después de cierto tiempo. El objetivo es entonces el establecimiento de *ligthpaths* y asignación de longitudes de onda de una forma que minimice la cantidad de bloqueos en la conexión o maximizar el número de conexiones que se establecen en la red en cualquier momento.

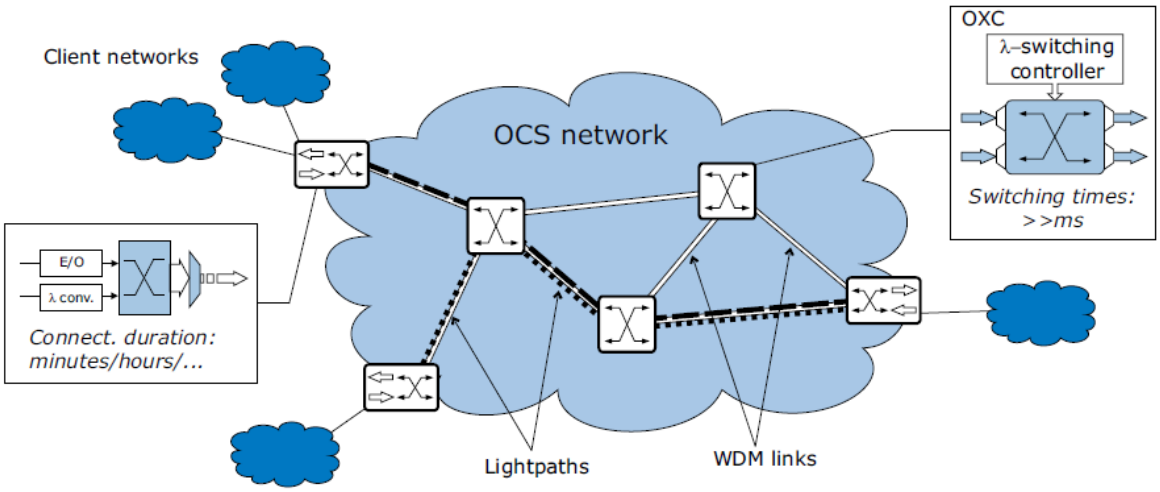


Figura 1.10. Red por conmutación óptica de circuitos OCS (Klinkowski 2007)

Según Venkatesh & Murthy (2010), una de las principales desventajas de OCS se debe a la configuración de los *ligthpaths* por largo tiempo lo que causa que los recursos no sean empleados eficientemente particularmente cuando se trata de tráfico por ráfagas como el tráfico de Internet, su naturaleza estática no se adapta a las características de un tráfico que es cada vez más dinámico y en ráfagas

(autosimilar). Un *ligthpath* se puede establecer por días, semanas o meses durante los cuales puede ser que no se genere suficiente tráfico para usar su capacidad. Para evitar este desperdicio de ancho de banda, se hace necesario que las redes ópticas tengan la capacidad de conmutar directamente los paquetes IP, esto es lo que propone la técnica por conmutación óptica de paquetes OPS (*Optical Packet Switching*) que se trata en el siguiente ítem.

Las redes OCS son sometidas a un proceso muy riguroso de diseño tratando en lo posible de emplear el menor número de longitudes de onda posible para lograr el nivel de conectividad deseado. Los criterios a tener en cuenta para diseñar esta clase de redes mediante el empleo de WR, en general son los siguientes: el diseño de la topología lógica (la cual será embebida en una topología física) para un tráfico dado, aspecto que se desarrolla en profundidad en Durán (2008); esta topología debe hacer un uso eficiente de las longitudes de onda teniendo en cuenta costo, flexibilidad, rendimiento, etc.; estos parámetros dependen tanto de las tecnologías de conmutación como del establecimiento de los caminos de luz.

1.4.2.1. Algunas consideraciones de diseño en OCS

En las redes OCS la demanda de tráfico se soporta en *lightpaths* permanentes y transparentes los cuales son conmutados ópticamente en los nodos intermedios. Un *lightpath* o camino de luz (o *wavelength path*) ocupa un transmisor E/O en el nodo origen, una longitud de onda en cada fibra por la que pasa y un receptor O/E en el nodo final. La demanda de tráfico se maneja desde la parte superior de los *lightpaths* (o topologías virtuales) y estos a su vez son encaminados desde el tope de las fibras ópticas, es por esto que a estas redes se les denomina redes ópticas multinivel. Cuando se requiere pasar de un *lightpath* a otro, la conmutación se hace electrónicamente en cada nodo OCS. El éxito de OCS radica en el hecho de disminuir el costo del equipo electrónico con respecto a las redes O/E/O puras, ya que el tráfico es tratado electrónicamente solo a los nodos de comienzo y fin de un *ligthpath*.

En la literatura sobre OCS es posible encontrar muchos trabajos sobre diseño de esta clase de redes donde se busca resolver el problema de Encaminamiento y Asignación de Longitudes de onda o RWA (Machida *et al.* 2008). Igualmente, se

tienen diferentes trabajos orientados a desarrollar el problema de protección de estas redes al momento de presentarse fallas en las conexiones, esto se hace siguiendo un esquema de redundancia. En esta Tesis se usan algunos métodos de control cognitivo que ayudan a resolver el problema RWA mediante meta heurísticas basadas en poblaciones, se recomienda revisar Capítulo 4.

1.4.3. Conmutación Óptica de Paquetes OPS (*Optical Packet Switching*)

En esta sección se realiza la descripción general de OPS, debido a la importancia que esta temática ha logrado obtener por parte de la comunidad científica y al ser considerada como la tecnología del futuro en cuanto a la conmutación óptica se refiere, se ha elaborado el Apéndice G para ampliar aspectos técnicos de OPS.

En OPS se emplean pequeños bloques o unidades de datos denominados paquetes, cada uno tiene un formato compuesto por un encabezamiento y una carga útil o pagada que corresponde a los datos de usuario, cuando un nodo de la red recibe un paquete por uno de los puertos de entrada, analiza la información del encabezamiento y de acuerdo con esta y una tabla de encaminamiento envía el paquete hacia un puerto de salida adecuado. Igualmente, de ser necesario el contenido del encabezamiento puede ser modificado.

El proceso que se sigue para enviar un paquete de un nodo origen a uno de destino se denomina almacenamiento y reenvío de paquetes SAF (*Store and Forward*), proceso que se realiza principalmente en el nivel red (*Layer* 3) según el modelo de referencia para la interconexión de sistemas abiertos OSI (*Open System Inteconnection*) y en el nivel IP del modelo TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*). Este concepto de la conmutación de paquetes ha sido empleado en muchas redes especialmente las denominadas redes de datos, como ejemplo se puede mencionar las redes tipo Ethernet (con cobertura LAN, MAN y WAN estos últimos mediante el estándar *carrier* ethernet), la red de redes Internet soportada en la suite de protocolos TCP/IP, ATM, entre otras (Spohn 1997).

En el caso de las redes ópticas, el reto que se enfrenta es poder realizar la conmutación de los mismos en el dominio completamente óptico, esto implica realizar una tarea de alta granularidad, contar con elementos de almacenamiento

óptico y realizar el procesamiento del encabezado sin emplear el dominio electrónico. Estos retos están aún en desarrollo y son elementos de procesos de investigación constante.

Haciendo una revisión de los componentes de una red OPS, se puede empezar por el formato del paquete óptico genérico definido por El-Bawab & Shin (2002) el cual se muestra en la figura 1.11, además de las bandas de guarda necesarias entre paquetes y la carga útil o pagada (*payload*) que corresponde a los datos de usuario, en ella se destacan los siguientes campos que forman parte del encabezamiento:

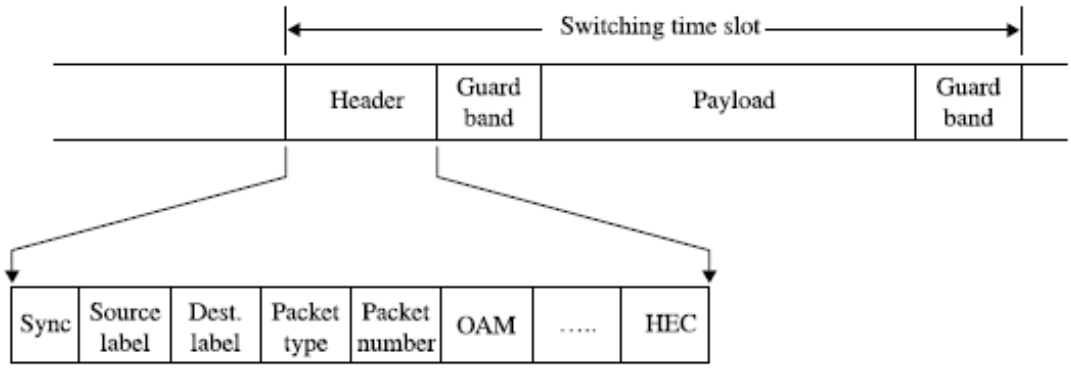


Figura 1.11. Formato general del paquete óptico. El-Bawab & Shin (2002)

- *Sync*: bits de delineamiento y sincronización.
- *Source Label*: dirección del nodo fuente.
- *Destination Label*: dirección del nodo destino.
- *Type*: tipo y prioridad del paquete y carga útil transportada.
- *Sequence Number*: número de secuencia del paquete, lo que permite la entrega ordenada de los mismos.
- *OAM*: funciones de Operación, Administración y Mantenimiento.
- *HEC (Header Error Correction)*: corrección de errores en el encabezamiento.

Existen distintos métodos para la codificación de los paquetes, por ejemplo, el encabezamiento del paquete puede ser codificado a una velocidad de bit menor que la de la carga útil transportada con el objetivo de simplificar el procesamiento electrónico del encabezamiento. En el nodo, el encabezamiento es convertido O/E y procesado electrónicamente, mientras la carga útil debe permanecer en el dominio óptico. En aras de poder realizar el procesamiento del encabezamiento en el dominio

óptico se propone el uso de correladores ópticos[13], es decir cuando un paquete llega al destino por medio de procesos de correlación se logra identificar la dirección de destino y se logra la que el paquete sea reenviado al puerto de salida apropiado (Clavero 2007). Igualmente, para almacenar temporalmente los paquetes se propone el empleo de fibras ópticas de retardo o FDL (*Fiber Delay Lines*) en los nodos las cuales se constituyen en lo más cercano a una memoria óptica, la cual puede ser distribuida entre todos los puertos de salida del nodo, en Zhang *et al.* (2006), se muestra que este método reduce la perdida de paquetes con la mejora en el desempeño de la red. La figura 1.12 muestra el esquema general de una red OPS, donde se observan sus componentes destacándose la arquitectura general de un nodo OPS (figura 1.13 a y b.

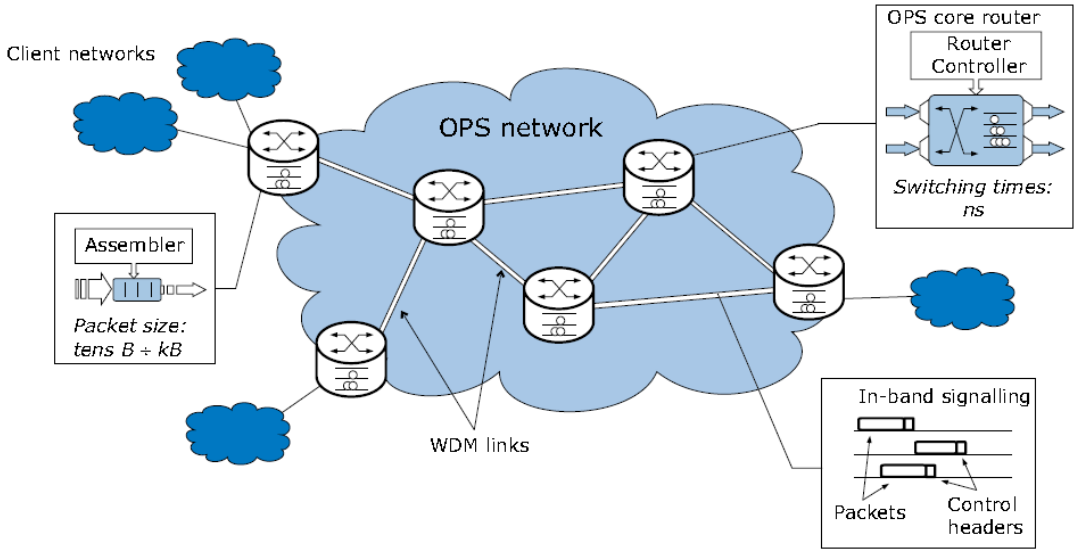


Figura 1.12. Red por conmutación óptica de paquetes (Klinkowski 2007)

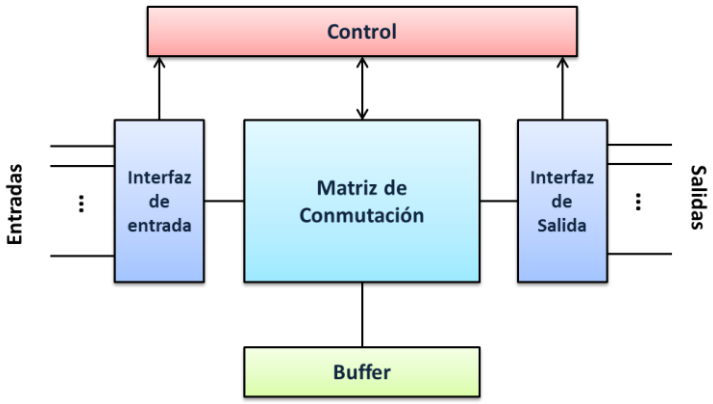
1.4.3.1. Arquitectura genérica de un conmutador OPS

Según la figura 1.13 a, un nodo OPS posee múltiples puertos de entrada y de salida y además consta de:

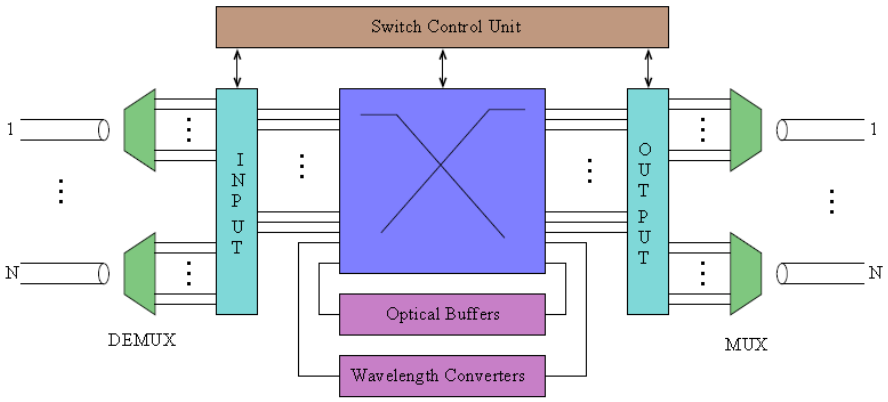
- Interfaz de entrada (*Input interface*)

[13] Un correlador óptico es un dispositivo usado para comparar dos señales mediante el empleo de la transformada de Fourier de un lente. En óptica se emplea para rastrear e identificar un objetivo

- Matriz de conmutación (*Switching matrix*)
- Memoria (*Buffer*)
- Interfaz de salida (*Output interface*)
- Unidad de Control Electrónica (*Electronic Control Unit*)



a)



b)

Figura 1.13. Arquitectura general de un nodo OPS a) diagrama en bloques (Maier 2008), b) Diagrama con mayor detalle (El-Bawab & Shin 2002)

Una descripción un poco más detallada de los diferentes bloques funcionales que componen un conmutador OPS y otras de sus características según Maier (2008, pp. 138-151) es la siguiente:

Interfaz de entrada, se encarga de:

- Delineamiento de los paquetes PD *(Packet Delination)*: identificación del comienzo y final de los paquetes y la carga útil.
- Conversión de longitud de onda WC *(Wavelength Conversion)*: convertir de ser necesario una longitud de onda externa en una interna.
- Sincronización *(Synchronization)*: empleada solo en conmutadores sincrónicos, permite el alineamiento de los paquetes que llegan sobre diferentes longitudes de onda y puertos de entrada.
- Procesamiento del Encabezamiento HP *(Header Processing)*: se extrae el encabezamiento del paquete, se realiza la conversión O/E, la decodificación y el reenvío hacia la unidad de control para el procesamiento electrónico.

Unidad de Control, se encarga de:

- Procesa la información de encaminamiento y configura el conmutador.
- Actualiza la información del encabezamiento y reenvía el encabezamiento hacia la unidad de salida.

Matriz de conmutación, se encarga de:

- Conmutación óptica de la carga útil o pagada (*payload*) de acuerdo con los comandos enviados desde la unidad de control.
- Resolución de la contención.

Interfaz de salida, se encarga de:

- Regeneración 3R (*Reamplification, Reshaping, Retiming*).
- Adiciona el encabezamiento actualizado al correspondiente paquete óptico.
- Delineamiento del paquete.
- De ser necesario realiza la conversión de longitud de onda interna a externa.
- Resincronización (solamente en conmutadores sincrónicos).

Maier (2008) dedica un capítulo a OPS donde se realiza un análisis en detalle de los elementos que componen la red y cómo es posible su implementación futura. Igualmente: Herzog, Maier & Reisslein (2004), Davik *et al.* (2004), Yuan, Gambiroza & Knightly (2004), Carena, Gaudino & Poggiolini (2004), Shrikhande *et al.* (2000),

Antonino *et al.* (2007), entre otros, realizan procesos de investigación sobre redes OPS empleando principalmente la topología en anillo, lo que ha servido como aporte para desarrollar algunos estándares como el IEEE 802.17 o RPR (*Resilient Packet Ring*), igualmente los proyectos como HORNET (*Hybrid Optoelectronic Ring NETwork*) y RINGO (*Ring Optical Network*).

Finalmente, se recuerda que en el Apéndice G se encuentra con mayor detalle una descripción de la denominada tecnología de conmutación óptica del futuro OPS.

1.4.4. Conmutación Óptica de Ráfagas OBS (*Optical Burst Switching*)

Por tratarse del esquema de conmutación que enmarca el desarrollo de la presente Tesis, a este ítem se dedicará un capítulo más adelante (Capítulo 2) en el cual se busca principalmente hacer un análisis de los procesos que se llevan a cabo en los nodos de borde (*edge Nodes*) en especial el proceso de ensamble de ráfagas y RWA sobre el cual se centran las diferentes propuestas de investigación. Sin embargo, en este aparte se hace una semblanza general sobre OBS que sirve como punto de comparación a nivel general con OCS y OPS.

1.4.4.1. Generalidades de OBS

Desde sus orígenes hace más de una década (Qiao & Yoo 1999), OBS se ha ganado la atención de diferentes investigadores alrededor del mundo, muchos visionarios sobre la evolución de las redes de alta velocidad muestran como referente a OBS como el eslabón para llegar a las redes completamente ópticas (y dar el soporte a Internet óptico). Este aspecto ha conducido al desarrollo de una gran variedad de estudios e investigaciones que han fortalecido el concepto y lo han llevado al punto donde se encuentra en la actualidad. Los procesos de investigación más desarrollados están alrededor de las técnicas de ensamblado y RWA además de sus efectos en el desempeño del sistema, los protocolos de reserva de recursos o algoritmos de planeación (*scheduling*) en los nodos que componen la red.

En OBS la unidad de transporte básica es la ráfaga[14], la cual contiene un número determinado de paquetes (ráfaga de datos) que generalmente son datagramas IP y a la cual se le asigna un encabezamiento o paquete de control. El proceso de agrupación o ensamble de las ráfagas suele hacerse teniendo en cuenta diferentes parámetros, uno de ellos es por dirección de destino, otro puede ser por clase de servicio aunque se puede hacer por cualquier criterio o combinación de criterios: dirección origen o destino, puertos de origen o destino, protocolos sobre IP, tipo de datos, etc. Igualmente, se han propuesto diversos criterios para decidir cuándo se debe enviar la ráfaga hacia el núcleo de la red, por ejemplo, según Choi & Kang (2005) se puede acumular todos los paquetes que lleguen durante un tiempo (con lo que su tamaño es variable) o se puede acumular exactamente una cantidad dada de bytes (con lo que el tiempo para formar una ráfaga es variable).

Las ráfagas se ensamblan y desensamblan en los nodos frontera o *edge nodes*, y cada formador de ráfagas se denomina *burstifier*. En principio, una ráfaga se la puede considerar como un paquete óptico que va desde el nodo entrada a la red OBS hasta el nodo salida de la red OBS sin sufrir ninguna conversión O/E/O. Para unir todas las parejas origen-destino y crear la red OBS se usan los nodos del núcleo, los cuales son conmutadores ópticos u OXC gobernados por una Unidad de Control electrónica CU (*Control Unit*).

Según se lee en Cao *et al.* (2003), Yoo (2006) y Maier (2008, pp. 106-108), en OBS, los procesos de señalización se hacen fuera de banda empleando paquetes (o señales) de control de ráfagas BCP (*Burst Control Packet*) o encabezamiento de control de ráfaga BHP (*Burst Header Packet*) los cuales son enviados por una longitud de onda dedicada, estos llevan información sobre la longitud de la ráfaga dirección de destino y requisitos de calidad de servicio QoS (*Quality of Service*) para la ráfaga. En la figura 1.14 se observa la estructura general de una ráfaga y en figura 1.15 se presenta la estructura del BCP.

El BCP o BHP y los datos (ráfaga de datos óptica) se transmiten separados físicamente en diferentes longitudes de onda con un intervalo de tiempo entre ellos denominado *offset.* Este tiempo es usado para procesar electrónicamente los

[14] Al ser la ráfaga la unidad especial de transporte en OBS, se hace necesario su estudio en detalle, aspecto que se aborda en el siguiente capítulo.

encabezamientos y reservar los recursos requeridos para la transmisión transparente de la ráfaga en el dominio óptico (Xiong, Vandenhoute & Cankaya 2000). En caso de presentarse congestión o contención en los puertos de salida de los nodos intermedios, éstos pueden tratar de controlarla o sino proceden a eliminar las ráfagas y los BCP, comportándose como todo sistema de comunicación no orientado a la conexión donde no se asegura la entrega de la información al destino, este aspecto se estudia en Lazzez, El Fatmi & Boudriga (2005), Choudhury *et al.* (2008) y Chakraborty & Choudhury (2010) donde se proponen diferentes mecanismos de control de contención además de los propuestos por Qiao & Yoo (1999).

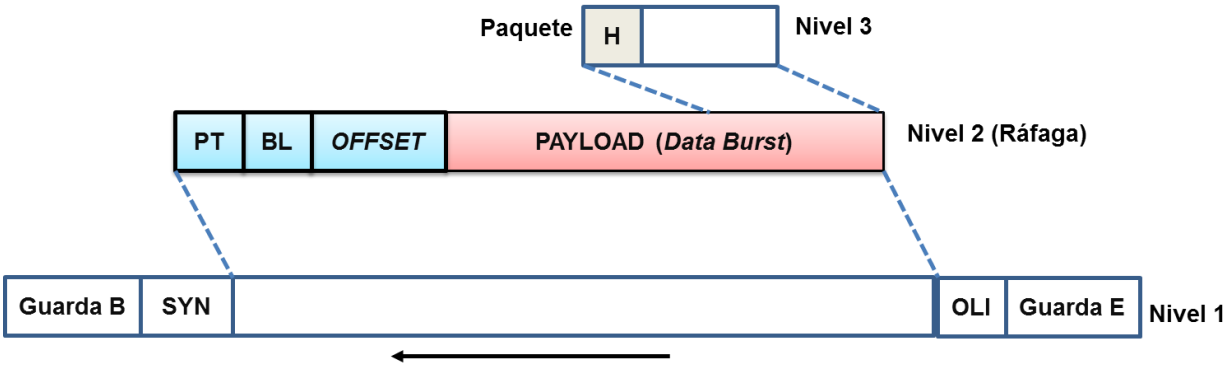


Figura 1.14. Estructura de una ráfaga en OBS

La información que transporta el BCP es fundamental para la configuración del nodo central, los aspectos que no pueden faltar son: longitud o duración de la ráfaga, valor del *offset*, prioridad de la ráfaga y longitud de onda asignada.

La ráfaga se transmite por un camino de luz o *lightpath* que se establece entre un nodo de origen y uno de destino generalmente sin la posibilidad de utilizar almacenamiento intermedio y existe solo durante la trasmisión de la ráfaga (Yang, Zheng & Verchere 2001), con lo cual una vez finalizada la fase de transmisión se liberan los recursos empleados que pueden ser usados en otro proceso de transmisión.

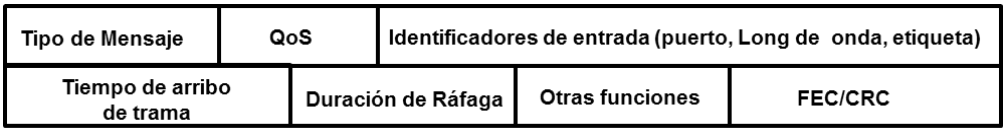


Figura 1.15. Estructura básica de un BCP (Franzl *et al*. 2011)

En la figura 1.16 se ilustra la interpretación del proceso de separación entre el BCP y la ráfaga de datos enviada por la fuente, se aprecia como el procesamiento del BCP se lleva a cabo en el dominio electrónico o nivel 3 y la ráfaga de datos es conmutada en el dominio óptico de acuerdo con la configuración realizada con la información del BCP.

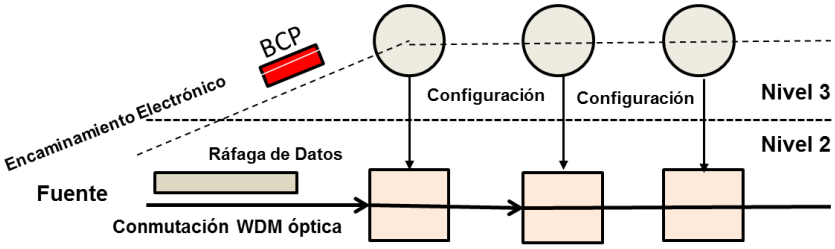


Figura 1.16. Proceso de envío de ráfagas en OBS

En resumen, existen diferentes características propias de OBS como el uso de la granularidad en la conmutación a nivel de sub-longitud de onda (*sub-wavelength*), lo que permite que sea considerado como un aspecto superior en el manejo y uso del ancho de banda óptico respecto a otras tecnologías como OCS y OPS. Igualmente, en la solución de contención sin la ayuda de memorias o almacenamientos ópticos. Otro aspecto relevante en OBS es el hecho de que la transmisión de la información de control se realiza separada de la ráfaga de datos del usuario, esto permite que solo una parte de la ráfaga (el paquete de control) sea procesado en el dominio electrónico y no toda la ráfaga la cual se transmite en una señal óptica que permanece en el dominio óptico durante todo el proceso que dura la transmisión de la misma.

Como se analiza en diferentes trabajos, este aspecto permite aprovechar mejor el ancho de banda y reducir los posibles retardos entre nodos y extremo a extremo que se puedan presentar. Es importante anotar que las redes OBS presentan distintas configuraciones, las cuales pueden mostrar funcionalidades diferentes entre ellas, dependiendo de los innumerables esquemas de análisis que se presentan en la literatura.

En seguida se hace una descripción de OBS comenzando por su arquitectura, su funcionalidad, sus componentes, algoritmos de ensamble de ráfagas, mecanismos de señalización y mecanismos de control de contención.

1.4.4.2. Arquitectura de redes OBS

El modelo general de la arquitectura de una red OBS se muestra en la figura 1.17, en ella se destacan sus principales componentes, estos son: los nodos de frontera o de borde (*edge nodes*) y los nodos del núcleo de red (*core nodes*) compuestos principalmente por conmutadores y unidades de control, los nodos de borde y del núcleo se encuentran unidos mediante enlaces WDM, a su vez también se presentan los posibles clientes de estas redes, como se ha anotado anteriormente, estos pueden ser redes ATM, SONET, rede IP las cuales suministran el mayor flujo de información que aprovecha todas la ventajas ofrecidas por las redes OBS como se evidencia en Germoni *et al.* (2011), Gringeri *et al.* (2010), Rodrigues & Vaidya (2009) y Cao *et al.* (2003), entre otros, debido a su comportamiento por ráfagas.

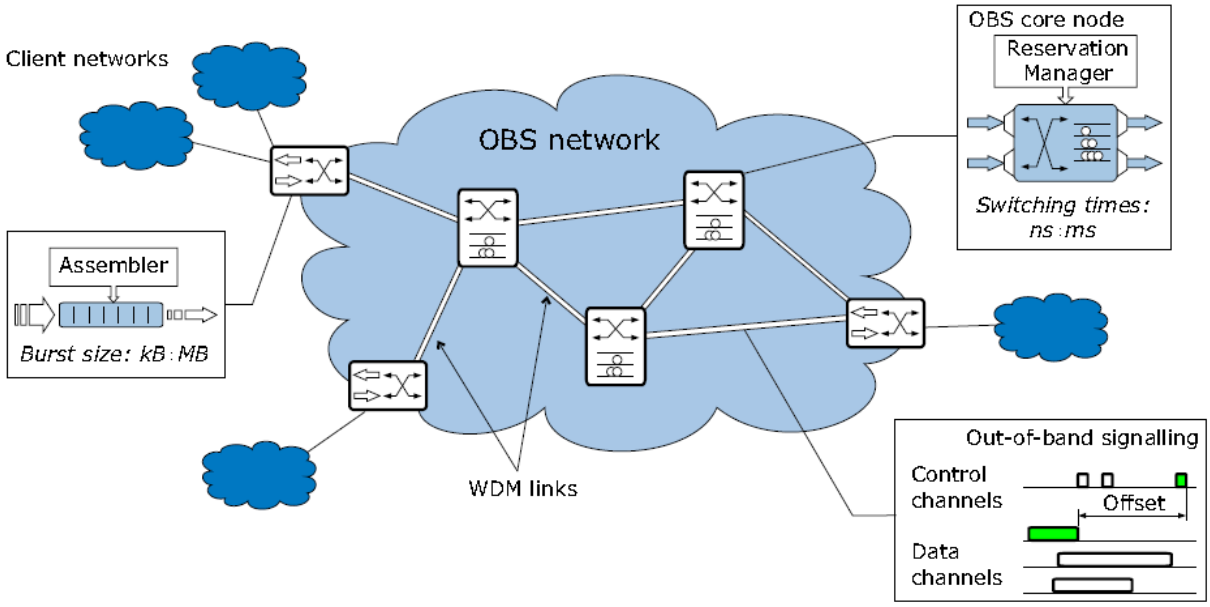


Figura 1.17. Red por conmutación óptica de ráfagas (Klinkowski 2007)

Los nodos de borde son la interfaz entre el dominio electrónico a nivel de clientes y el dominio óptico a nivel de núcleo OBS. Estos nodos pueden ser de ingreso y de egreso, en cada uno de estos nodos el proceso que se sigue es el siguiente: los paquetes provenientes de los clientes (de una o varias fuentes) entran al nodo de ingreso donde son ensamblados en ráfagas de acuerdo con un algoritmo de ensamble y enviados a través del núcleo de la red el cual está compuesto por nodos OXC cuya principal función es encaminar la ráfaga hasta un nodo de destino o nodo

de egreso donde las ráfagas se desensamblan y los paquetes son entregados a los clientes finales.

1.4.4.3. Infraestructura de OBS

En esta sección se hace una descripción sobre los elementos que componen la infraestructura de red OBS con base en la figura 1.17 y de acuerdo con enfoque que siguen diferentes publicaciones sobre la temática, entre ellos Qiao & Yoo (1999), Yoo (2006) y Maier (2008). Se empieza describiendo la infraestructura de los nodos de borde, su funcionalidad y sus procesos, continuando luego con la infraestructura de núcleo. En una sección siguiente se detallan los aspectos de ensamblaje de las ráfagas, algoritmos de planificación, esquemas de señalización, diferenciación de servicios, estrategias para resolución de contención, entre otros elementos de relevancia. La figura 1.18 muestra un esquema en bloques funcionales de los componentes de una red OBS acorde con descripciones hechas en Chandra, Turuk & Sahoo (2009), Chen, Qiao & Yu (2004), Jue & Vokkarane (2005) y Singh *et al.* (2011).

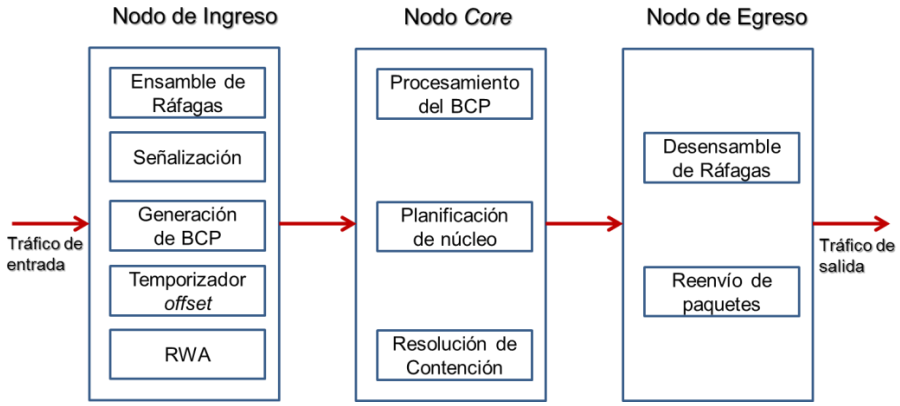


Figura 1.18. Esquema funcional de una red OBS

- **Infraestructura de frontera (Nodo de Frontera – *edge node*)**

Como se observa en la figura 1.18, los nodos de frontera llevan a cabo las funciones de ensamble de ráfagas, definición y aplicación de los esquemas de señalización, el encaminamiento y asignación de longitudes de onda RWA (*Routing and Wavelength Assignment*), la generación del BCP y el cálculo del tiempo *offset* entre el BCP y la ráfaga de datos, la mayoría de estas funciones se realizan en el dominio electrónico.

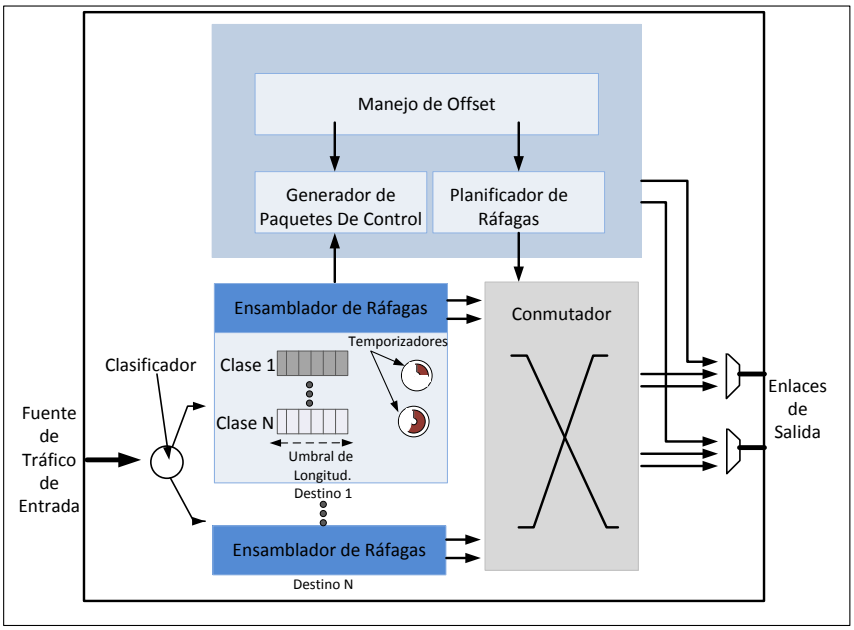
En la figuras 1.19 a) y b) se muestran esquemas de un nodo de frontera para el ingreso de tráfico IP desde diferentes fuentes, estos modelos sirven de guía en la descripción de los procesos llevados a cabo en esta infraestructura, en ella se definen los diferentes bloques que componen un nodo de ingreso desde que el tráfico es ensamblado hasta que se le asigna su camino óptico.

- **Ensamble de ráfagas**

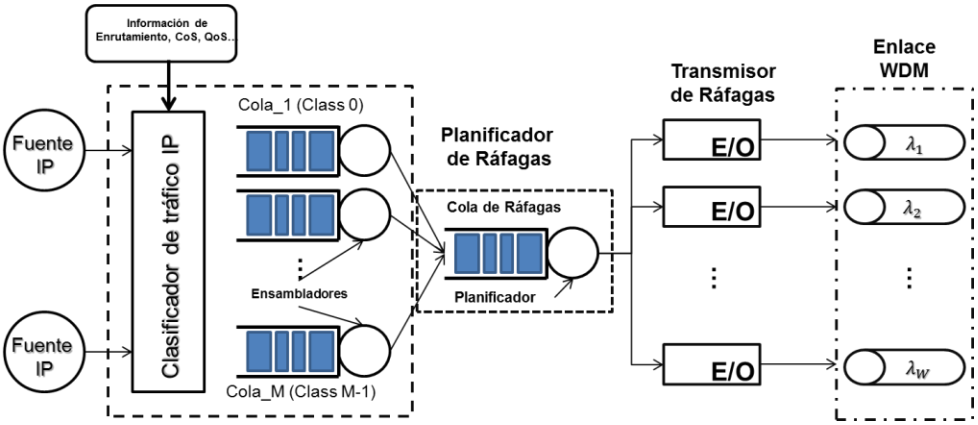
Los usuarios de la red OBS son los encargados de agrupar el tráfico de entrada originado en los niveles superiores (por ejemplo tráfico IP), el cual es ordenado en paquetes que con ayuda de la información de encaminamiento y a través de un clasificador de tráfico (*classifier*) se distribuye en diferentes colas que están ordenadas de acuerdo con diferentes parámetros (puede ser calidad de servicio y clases de servicios o por dirección de destino, entre otros).

Es en este arreglo de colas donde finalmente se ensamblan la ráfagas, cuya longitud depende del algoritmo de ensamble seleccionado (por tiempo fijo y adaptativo, por longitud o tamaño de ráfaga e híbrido o mixto) o los nuevos esquemas propuestos en Xiong, Vandenhoute & Cankaya (2000), Ramantas & Vlachos (2009), se destaca en este punto la importancia que tiene la elección del algoritmo de ensamble en el desempeño de la red OBS (este aspecto afecta los diferentes parámetros que inciden en la calidad de servicio extremo a extremo), una vez generadas las ráfagas son enviadas a un planificador de ráfagas (*burst scheduler*) el cual se encarga de ubicarlas en la respectiva longitud de onda perteneciente a un enlace WDM como se observa en Yunhan & Sheng (2005).

Sobre los mecanismos utilizados para ensamble de ráfagas se han hecho un gran número de estudios y se han publicado muchas referencias, precisamente buscando encontrar algoritmos que eviten enviar ráfagas muy cortas a la red OBS y se reduzcan los tiempos de ensamble, se presentan resultados de simulación en Amin *et al.* (2009) y Monteiro & Pires (2009).



a) Nodo de Ingreso OBS (Klinkowski 2007)



b). Modelo de un nodo de ingreso en una red OBS

Figura 1.19. Modelo de Nodo de ingreso OBS: a) incluye conmutador y b) incluye planificador de ráfagas

En el caso de emplear mecanismos con tráfico constante y de asignación de umbral de ráfagas dependiendo de la clase de servicio se cuentan referencias como en Hołynski & Faisal (2011) y en Choudhury, Ponda & Debnath (2007) donde también se estudia el efecto de la selección de algoritmos de ensamble de ráfagas en el tráfico de la red haciendo que se tenga una distribución de tipo Gaussiana para un tráfico de entrada con distribución Poisson. Lazzez, El Fatmi & Boudriga (2005)

revelan estudios sobre mecanismos predictivos que permiten realizar los procesos de ensamble y reserva de recursos en forma paralela. Igualmente, en Choudhury *et al.* (2008) y Chakraborty & Choudhury (2010), se proponen mecanismos de ensamble de ráfagas algunos basados en el análisis de la correlación del tráfico en la fuente IP para formar ensambladores de tráfico estáticos y dinámicos.

En resumen, cuando se trata sobre el ensamble de ráfagas en redes OBS se presentan algoritmos de ensamble por tiempo (*timer-based*) donde se define un tiempo de ensamble de ráfaga que puede ser fijo, por longitud de ráfaga (*burstlength-based*), un algoritmo mixto (*mixed time/burst length-based*) donde se espera que se cumpla el tiempo o se alcance longitud de ráfaga propuesta y algoritmos adaptativos o dinámicos donde los valores de tiempo y longitud de onda se fijan de acuerdo con las condiciones de tráfico de la red OBS. Es importante anotar que los algoritmos de ensamble de ráfagas ejecutados por los nodos de borde ayudan a suavizar el proceso de los paquetes IP que ingresan a la red y ayudan a reducir el grado de auto similitud del tráfico IP (Yu, Qiao & Liu 2004; Ge, Callegati & Tamil 2000). Esto permite simplificar los proceso de ingeniería de tráfico y la planeación de redes OBS.

En general se puede anotar que todos los estudios van dirigidos a proponer mecanismos de ensamble que permitan mejorar el desempeño de la red OBS con incidencia directa sobre la probabilidad de pérdida de ráfagas y el retardo extremo a extremo.

En el siguiente capítulo se hace una descripción con mayor detalle de las funciones del nodo de ingreso OBS con especial enfoque en los mecanismos de ensamble de ráfagas, dado que uno de los objetivos de la Tesis se enfoca al estudio de los diferentes esquemas empleados para el ensamble de ráfagas propuestos en la literatura.

- **Mecanismos de Señalización**

En la señalización OBS se adapta el mecanismo estándar para la transferencia de bloques de datos en ATM denominado ABT (*ATM Block Transfer*) propuesto en la recomendación I.300 de la ITU-T. Este proceso es empleado para configurar una conexión en una red OBS entre un par de nodos de frontera a través de nodos

centrales. Se presentan diferentes variaciones para los protocolos de señalización en OBS dependiendo de cómo y cuándo los recursos a lo largo de la ruta se reservan para una ráfaga. En particular un esquema de señalización se puede caracterizar por:

- Reservación en una vía, en dos vías o híbrido.
- Reservación iniciada en la fuente, en el destino o en un nodo intermedio.
- Reservación persistente o no persistente.
- Reservación inmediata o retardada.
- Liberación de recursos implícita o explícita.
- Señalización centralizada o distribuida.

La figura 1.20 muestra un cuadro resumen sobre la clasificación de los distintos esquemas de señalización empleados en redes OBS.

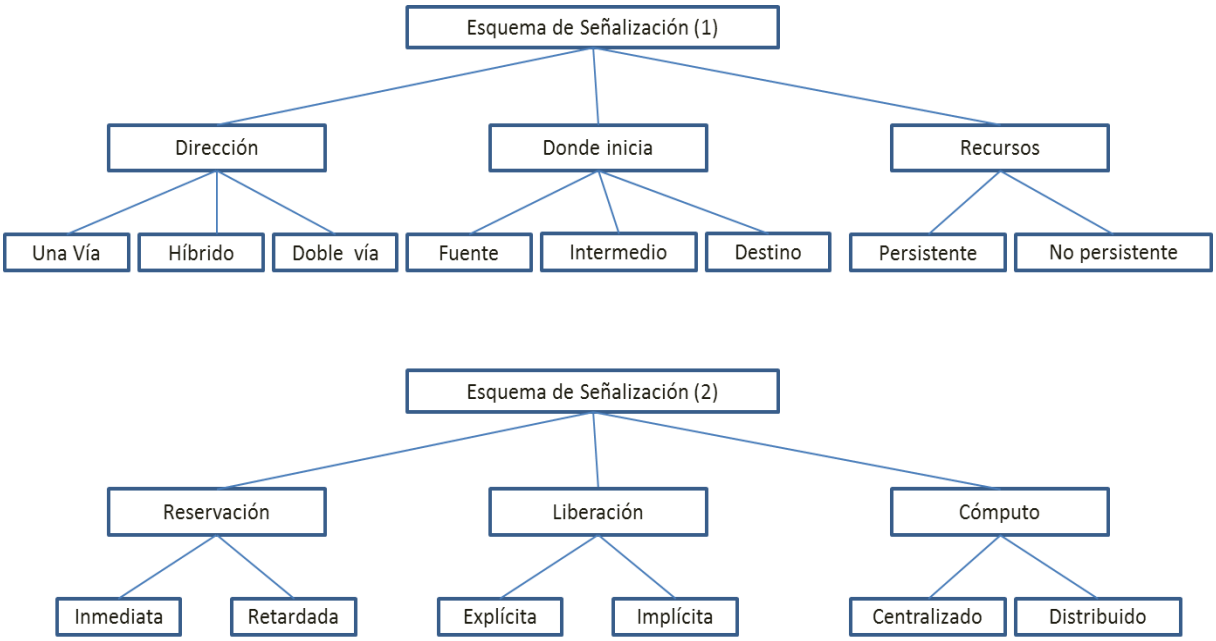


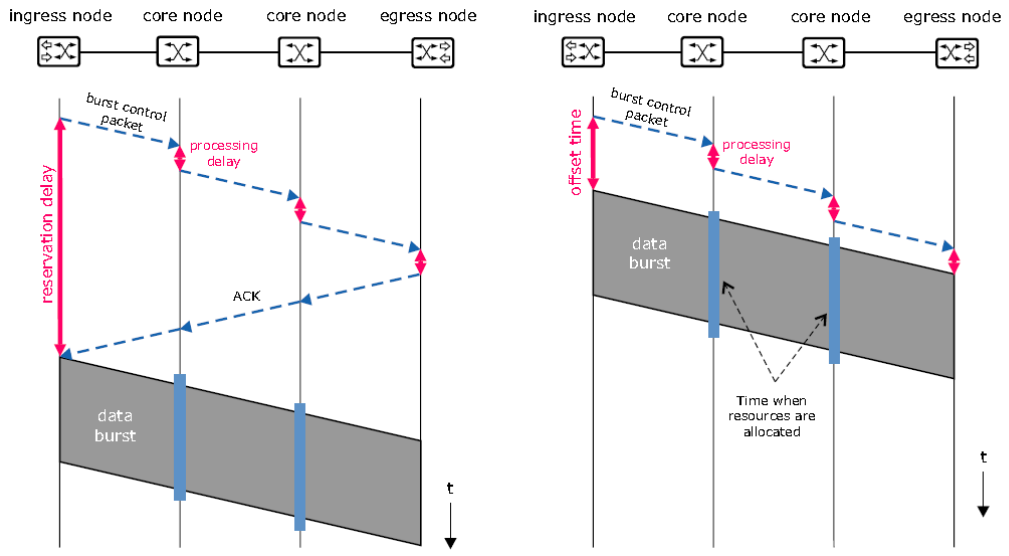
Figura 1.20. Clasificación de los esquemas de señalización

En general en muchos estudios sobre redes OBS se emplean dos tipos de señalización:

1. Señalización distribuida con reserva en un sentido (*one way reservation*), ver Maier (2008, pp. 105), Chaing *et al.* (2007), Anan, Chaudhry & Benhaddou (2006) y Marchetto (2010).

2. Señalización centralizada con reserva extremo a extremo (*end to end reservation*), ver Düser & Vayvel (2002).

La mayoría de propuestas se centran en el primer tipo de señalización y están basadas en el principio TAG (*Tell And Go*) propuesto por Hudek & Muder (1995) cuyo diagrama se muestra en la figura 1.21. En este método el nodo de ingreso de borde envía un paquete de control de ráfaga BCP en un canal de control fuera de banda el cual es convertido O/E/O en cada nodo y luego de un tiempo *offset* sin recibir confirmación (ACK) transmite la ráfaga de datos o *payload*, en caso de presentarse congestión en alguno de los nodos del núcleo, la ráfaga se descarta. Dentro de estos métodos se destacan fundamentalmente dos JIT (*Just In Time*) estudiado en Baldine *et al.* (2002) y Marchetto (2010) y el mecanismo JET (*Just Enough Time*) propuesto inicialmente en Xiong, Vandenhoute & Cankaya (2000). Igualmente en Vlachos & Monoyios (2008; 2009) y Roeck *et al.* (2011) se presentan variaciones de los modelos de señalización propuestos inicialmente y se muestran variantes y formas de evaluación de los mismos.



a) *two-way* b) *one-way*

Figura 1.21. Señalización OBS (a) centralizada con reserve *two-way* y (b) distribuida con reserva *one-way* (Battistelli & Perros 2003)

En la señalización JIT un nodo OBS configura sus conmutadores ópticos para la ráfaga entrante inmediatamente después de recibir y procesar el correspondiente BCP (Baldine *et al.* 2002). De esta forma, los recursos del nodo OBS quedan disponibles antes que la ráfaga llegue. En el caso de la señalización JIT no se hace un uso adecuado de los recursos del nodo ya que las longitudes de onda son reservadas antes que la ráfaga llegue sin tener en cuenta el tiempo *offset*.

Para mejorar la eficiencia en las redes OBS, la señalización JET hace uso del tiempo *offset* que se transporta en el BCP (Chen, Qiao & Yu 2004), con este mecanismo se logra una mejor utilización de las longitudes de onda disponibles en los nodos de la red OBS llevando a cabo la reserva retardada para las ráfagas entrantes. Con este mecanismo los conmutadores ópticos se configuran antes que se cumpla el tiempo *offset*.

La mayor diferencia entre JET y JIT es el tiempo de configuración de los conmutadores en los nodos OBS. En el primero los conmutadores son configurados justo antes que la ráfaga llegue al nodo, por su parte en JIT se configuran una vez que el BCP se haya recibido y procesado. Otro aspecto importante de JET es que la información sobre la longitud de la ráfaga que se transporta en el BCP se emplea para cerrar el proceso de reserva hecho (es el caso de una ráfaga tenga determinada duración sin una liberación explicita), esto ayuda a los nodos a tomar decisiones inteligentes sobre cuando es posible planificar un nuevo arribo de ráfagas. Como resultado, la señalización JET supera a JIT en términos de utilización del ancho de banda y probabilidad de pérdida de ráfagas, esto a expensas de aumentar la complejidad computacional (Maier 2008).

Para el segundo esquema de señalización centralizada con reserva extremo a extremo se lleva a cabo un proceso en dos vías (*two way*), el nodo de borde envía su requerimiento de conexión a un servidor central (nodo central), el cual tiene un conocimiento global sobre el estado de cada uno de los nodos y de los canales de datos de la red OBS. Con este conocimiento, el servidor central procesa todas las solicitudes de conexión recibidas y devuelve un ACK (en caso exitoso) a los nodos de borde. Una vez que estos nodos reciben el ACK proceden a transmitir sus ráfagas. A las redes OBS que operan bajo este esquema se las conoce como redes WROBS (*Wavelength Routed OBS*. Una desventaja de este esquema es el

incremento en los retardos de reserva en el establecimiento de la conexión. Por lo cual se lo conoce como proceso de transmisión retardada o señalización TAW (*Tell and Wait*).

Finalmente, cabe destacar que en el Capítulo 3 del presente documento, se retoma este aspecto y se consignan resultados de procesos de simulación respecto a la comparación entre los diferentes esquemas de señalización en redes OBS de prueba.

- **Algoritmos de planificación**

En OBS, las ráfagas tienen diferentes tiempos *offset* y no arriban en el mismo orden que siguen los BCP correspondientes. Entonces, se puede planificar la salida de una ráfaga en más de una longitud de onda a la salida y las ráfagas que tienen un *offset* mayor podrían seleccionar una longitud de onda de salida antes de otra ráfaga que tenga un *offset* menor, esto puede ocasionar que un canal seleccionado este libre un intervalo de tiempo antes de ser usado por la ráfaga, a estos intervalos se los conoce como tiempos desocupados o *idle* (*void*), igualmente, este aspecto permite la clasificación de los mecanismos de planificación en dos categorías *non-void filling* y *void filling* (Xu *et al.* 2004), los primeros son los más rápidos pero han demostrado ineficiencia en el manejo de ancho de banda y los segundos presentan mayor eficiencia en el manejo de ancho de banda pero tienen una alta complejidad de implementación y consumen mayores recursos computacionales.

Los mecanismos más desarrollados son, del primer grupo el denominado Horizon (Turner 1999) o también llamado LAUC *(Latest Available Unused Channel*) sin empleo de tiempos *void*, del segundo grupo LAUC-VF (*Latest Available Unused Channel with Void Filling*) empleando los tiempos desocupados (*void*) entre tiempos planeados para planear otras ráfagas y tratar de mejorar.

Existen variantes de LAUC-VF (Xiong, Vandenhoute & Cankaya 2000), entre ellas Min-SV (*Starting Void*), Min-EV (*Ending Void*) y *Best Fit*, que consiguen similares prestaciones (Chaing *et al.* 2007) y Anan, Chaudhry & Benhaddou (2006). Según lo prupuesto inicialmente por Xiong, Vandenhoute & Cankaya (2000), Yang, Zheng & Verchere (2001) y Roeck *et al.* (2011), existe una amplia variedad de soluciones que

implican la definición y adopción de mecanismos con mayor eficiencia en la planeación especialmente de las ráfagas generadas en los nodos de frontera OBS (Ramantas & Vlachos 2009). La figura 1.22 ilustra los diferentes mecanismos de planificación en una primera aproximación y la tabla 1.4 muestra una comparación entre diferentes algoritmos de planificación destacando características de complejidad en el tiempo y la utilización del ancho de banda.

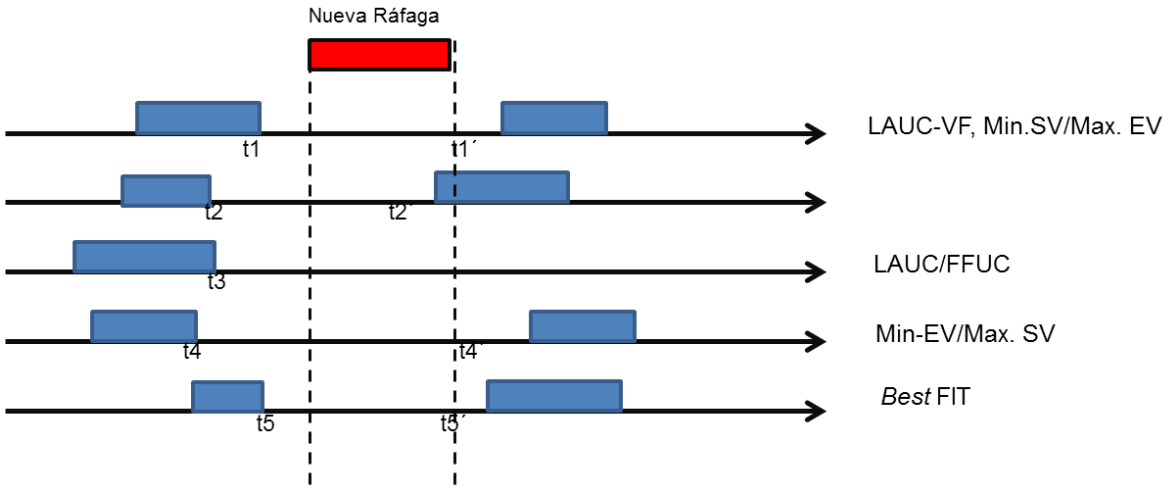


Figura 1.22. Mecanismos de planificación de ráfagas en OBS

Algoritmos	Complejidad temporal	Información de estado	Empleo de ancho de banda
LAUC	$O(W)$	Horizon$_i$ del i^{th} canal	Bajo
LAUC-VF	$O(WlogM)$	Tiempo de reserva del canal	Alto
Min-SV/EV	$O(logM)$	Tiempo de reserva del canal	Alto
Best Fit	$O(log^2M)$	Tiempo de reserva del canal	Alto

Tabla 1.4. Comparación entre distintos algoritmos de planificación

- **Encaminamiento y asignación de longitudes de onda RWA (*Routing and Wavelength Assignment*)**

Este proceso se comienza a estudiar con las denominadas redes ópticas con encaminamiento por longitud de onda o WRON (*Wavelength Routed Optical*

Network) en general sobre estas redes se establecían *lightpaths* estáticos o al menos no reconfigurables con frecuencia. Para el establecimiento de los *ligthpaths* se proponen mecanismos para encontrar inicialmente la ruta a seguir y posteriormente se busca asignar una longitud de onda para un conjunto de conexiones a establecer en una red. Se busca que minimizar el número de longitudes de onda para satisfacer una demanda de conexiones, aunque también se busca maximizar el número de conexiones que pueden establecerse con un conjunto limitado de longitudes de onda, igualmente, se busca minimizar la probabilidad de bloqueo.

A este proceso se lo conoce como el problema de encaminamiento y asignación de longitud de onda RWA (*Routing and Wavelength Assignment*), este puede ser estático o dinámico DRWA (*Dynamic RWA*), su solución se aborda desde diferentes perspectivas y se busca un uso más eficiente de los recursos (longitudes de onda) y disminuir la perdida de información. Sin embargo en estudios realizados (Chlamtac, Ganz, & Karmi 1992) demostraron que para el caso estático este problema es NP-completo, es decir que no puede resolverse en tiempo polinomial con lo cual la complejidad computacional crece más rápido que el problema mismo, debido a estos recurre al uso de heurísticas, meta heurísticas y más recientemente a súper heurísticas.

Por lo general el problema RWA se divide o separa en encaminamiento y asignación de longitudes de onda, o R+WA donde primero se selecciona una ruta de una lista o calculada dinámicamente, y en seguida se trata de asignarle una longitud de onda que se selecciona de acuerdo con un determinado criterio. Este proceso se repite en caso de no encontrar una ruta disponible. También se puede abordar de forma inversa es decir WA+R es decir primero se selecciona una longitud de onda y se prueba con las rutas de la lista o calculada dinámicamente hasta que se encuentre una ruta en la que se pueda usar esa longitud de onda (Durán 2008). De los dos procesos el primero es el más usado y será el empleado en esta Tesis.

Como variante de la redes WRON se encuentran las redes WSON[15] (*Wavelength Switched Optical Networks*) donde se busca el transporte de IP sobre WDM, para esta clase de redes se proponen dos mecanismos de encaminamiento, uno para el

[15] Este aparte se toma del RFC 6163 de la IETF de abril de 2011.

encaminamiento de los *lightpaths* mediante el empleo de algoritmos RWA en la capa óptica y el encaminamiento de tráfico mediante protocolos IP sobre estos *lightpaths*. En esta última clase de redes se realizan estudios donde las restricciones de los efectos lineales y no lineales del nivel físico tienen una incidencia directa sobre el comportamiento de los demás niveles. En la tabla 1.5 se muestra según el RFC[16]4054 de la IETF el impacto que estos efectos tienen en las redes reales. En Lázaro (2010) se hace un estudio en detalle de este impacto en la redes WSON. Se destaca el impacto de la Dispersión por modo de polarización o PMD (*Polarization Mode Dispersion*) sobre redes a 40Gbps y 100Gbps, según el formato de modulación empleado.

Limitación física	Varianza en el tiempo	Importancia en IA-RWA	Rango
Dispersión cromática	Estático	Alta	0-5000km/ns/km
Concatenación de filtros	Estático	Alta (según tipo ROADM)	0-10dB
OSNR	Dinámico	Alta	0-40dB
PMD	Estático	Alta (según formato modulación)	0-5 ps/√km
FWM	Dinámico		
Non-linear phase Noise	Dinámico	Media	0-10 rad/s
SBS	Dinámico	Media	-
SPM	Dinámico	Media	0-10 rad/s
SRS	Dinámico	Media	-
WC-XT	Dinámico	Media	-
XPM	Dinámico	Media	-

Tabla 1.5. Impacto de los efectos lineales y no lineales en redes WSON (Lázaro 2010)

En esta Tesis sobre la red OBS de prueba se aborda una solución del problema DRWA (*Dynamic* RWA) mediante algoritmia meta heurística basada en poblaciones como es el caso de los Algoritmos Genéticos, estas meta heurísticas se caracterizan

[16] RFC Request For Comments document IETF

por su viabilidad computacional y limitación en retardo, estos aspectos son imprescindibles para una implementación en entorno lo más real posible. Sin embargo en esta ocasión se hace uso de los métodos clásicos[17] para obtener la solución R+WA.

Siguiendo con los mecanismos de encaminamiento clásico estudiados mediante técnicas heurísticas las más empleadas se resumen en la tabla 1.6. (Durán 2008)

Tipos de encaminamiento (visión clásica) Ben *et al.*(2002)
Encaminamiento Fijo FR (*Fixed Routing*): se realiza el pre cálculo una única ruta entre cada par de nodos, generalmente el camino más corto o el menos costoso, el retardo de propagación es conocido. En este caso el bloqueo es alto y se requiere un número elevado de longitudes de onda.
Encaminamiento Fijo – Alternado FAR (*Fixed Alternated Routing*): en este caso se tienen pre-calculadas varias rutas (mediante una función de costo fija) generalmente disjuntas y ordenadas ascendentemente según la longitud de los saltos. Si no se puede establecer con la primera, se trata con la siguiente y así sucesivamente. El bloqueo disminuye y se obtiene buen comportamiento a partir de tres (3) rutas.
Encaminamiento Adaptativo AR (*Adaptive Routing*): es de tipo dinámico a diferencia de las estrategias anteriores, se puede contar con un conjunto de rutas pre calculadas pero reordenadas de acuerdo con el estado de la red. También se puede realizar el cálculo de la función de costo por enlace en tiempo real, actualizándose tras el establecimiento o finalización de alguna conexión. Se considera información del estado de la red en la función de costo.

Tabla 1.6. Estrategias de encaminamiento

Tradicionalmente se han evaluado las prestaciones de red mediante el cómputo de la probabilidad de bloqueo de red; que se estimaba mediante métodos analíticos y de simulación bajo la asunción de una capa física ideal que no cause efectos nocivos sobre una señal transmitida. En Agrawal (2001), Marsden, Maruta & Kitayama (2008) y Pachnicke, Paschenda & Krummrich (2008) se presentan estudios sobre las prestación es de estas estrategias denominadas clásicas.

[17] En este contexto los métodos clásicos no consideran la incidencia del nivel físico en la transmisión óptica.

En la tabla 1.7 se presenta una selección de técnicas de encaminamiento clásicas que pueden clasificarse bajo los criterios de flexibilidad expuestos anteriormente en la tabla 1.6. De requerirse con posterioridad estos esquemas se pueden ampliar con mayor detalle.

Algoritmo	**Estrategia**	**Objetivo**	**Clasificación**
Shortest Path, SP (Bellman 1958)	Minimiza el costo total de la ruta	Minimizar el consumo de recursos	Fijo o Fijo alternado
Hop Weight, HW (Bhide *et al* .2001)	Selecciona el camino de mínimo número de saltos.	Minimizar la probabilidad de bloqueo	Fijo o Fijo alternado
Distance Weight, DW (Bhide, Sivalingam & Fabry-Asztalos 2001)	Selecciona el camino de mínima distancia en microsegundos	Minimizar el retardo	Fijo alternado
Minimum Number of Hops, MNH (Baroni & Bayvel 1997)	Disminuye el enlace más cargado y asigna en primer lugar la longitud de onda ("λ") a las rutas más largas.	Minimiza la probabilidad de bloqueo. Es la base de HPLD.	Adaptativo
Available Wavelengths, AW (Bhide, Sivalingam & Fabry-Asztalos 2001)	Selecciona el camino con mayor número de longitudes de onda disponibles	Minimizar la probabilidad de bloqueo	Adaptativo
Hop and Available Wavelengths, HAW (Bhide, Sivalingam & Fabry-Asztalos 2001)	Selecciona el camino considerando el número de saltos y as longitudes de onda disponibles.	Minimizar la probabilidad de bloqueo	Adaptativo
Total and Available Wavelengths, TAW (Bhide, Sivalingam & Fabry-Asztalos 2001)	Considera el estado de la red, longitudes de onda disponibles y totales	Minimizar la probabilidad de bloqueo	Adaptativo
Hop Count and Total Wavelengths and Available Wavelengths, HTAW (Bhide, Sivalingam & Fabry-Asztalos 2001)	Considera el número de saltos y el estado de la red, y las longitudes de onda disponibles y totales	Minimizar la probabilidad de bloqueo	Adaptativo
Modified Future Cost, MFC	Emplea una función de costo combinada de distancia y carga de enlace	Mejorar la probabilidad de bloqueo de CDT	Adaptativo

		incorporando equilibrado de carga	
Least Congested Path Routing, **LCPR** (Zang, Jue & Mulkherjee, 2000; Murthy & Gurusamy 2003)	Selecciona el camino de mínima congestión	Equilibrar carga	Adaptativo
Weight Least Congested Path Routing", WLCPR	Selecciona el camino de mínima congestión con pesos	Equilibrado de carga. Admite la consideración de otros criterios	Adaptativo
Heaviest Path Load Deviation", HPLD (Siregar, Takagi & Zhang, 2003)	Emplea una función de costo en función de la carga de los enlaces	Reencamina los *lightpaths* más cargados. Asigna la longitud de onda primero a las rutas más largas.	Adaptativo

Tabla 1.7. Algoritmos de encaminamiento clásicos (Lázaro 2010)

El algoritmo LCPR puede resolver el problema R+WA por separado y ha demostrado que su costo computacional más bajo que otras opciones como HPLD. Por lo general el algoritmo de menor costo SP tienen como objetivo minimizar la probabilidad de bloqueo de conexión, y constituyen la base o punto de partida de la algoritmia heurística de encaminamiento para el problema DRWA.

Desde hace varios años se han diseñado una serie de algoritmos SP (*Shortest Path*), entre los más conocidos están:

- El algoritmo centralizado de Dijkstra, que emplea teoría de grafos (Dijkstra 1959).
- El algoritmo de camino de menor costo que puede contener ciclos, propuesto por E. Q. Vieira Martins (1984).
- El algoritmo Bellman-Ford, descrito en (Bellman 1957). Debido al enfoque distribuido cada nodo intercambia tablas de encaminamiento con sus nodos vecinos y actualiza su propia tabla de encaminamiento en consonancia.
- El algoritmo de Yen que permite calcular ("k") caminos más cortos (Yen 1971).

El algoritmo SP es adecuado para el problema DRWA clásico gracias a la posibilidad de emplear cualquier función de costo por enlace, así como la posibilidad de desarrollarlo bajo enfoques de encaminamiento fijo, fijo-alternado o adaptativo.
El algoritmo de camino de menor costo fijo FSP (*Fixed Shortest-Path*) aplicado al problema DRWA se utiliza de la siguiente manera (Zang, Jue & Mulkherjee 2000):

- Se calcula un camino como ruta predeterminada para el par origen-destino.
- Se asigna una longitud de onda disponible a ese camino.
- Si no hubiera ninguna longitud de onda disponible a lo largo del camino, la petición se rechaza.

El algoritmo de camino de menor costo fijo-alternado FASP ("*Fixed-Alternate Shortest Path*) aplicado al problema DRWA, se caracteriza porque se realiza en primer lugar el cómputo de ("k") caminos y posteriormente se comprueba su validez, hasta encontrar un camino viable de acuerdo a criterios de disponibilidad de longitud de onda. Este algoritmo requiere de funciones de costo fijas similares a las de la versión FSP. La mejora en prestaciones de FASP es notable a partir de ("k") igual a 3. Sin embargo, la mejora en prestaciones es mayor mediante el cómputo del camino de menor costo con una función de costo adaptativa, o lo que es lo mismo, el algoritmo ASP (*Alternate Shortest Path*). Mediante ASP el costo de los enlaces se actualiza al establecer un nuevo *lightpath* en la red, esto permite la incorporación de criterios de carga de los enlaces a su función de costo. La necesidad de balanceo de carga es un criterio muy relevante en el tratamiento del problema DRWA.

Bhide, Sivalingam & Fabry-Asztalos (2001) se hace un estudio del algoritmo AW (*Available Wavelengths*) y se propone su cálculo de la siguiente manera:

Inicialmente, la red se representa mediante el grafo $G(V,E)$ siendo V el conjunto de nodos (vértices) y E el conjunto de enlaces, cada enlace $(i,j) \in E$ se le asocia una función de peso (o costo) w_{ij} la cual denota el costo de utilizar el enlace. Igualmente, si se basa en el número de saltos, se tiene que $w_{ij} = 1, \forall(\mathrm{i},\mathrm{j}) \in E$. Y en el caso de la Distancia, $w_{ij} = d_{ij}, \forall(\mathrm{i},\mathrm{j}) \in E$ con d_{ij} siendo la distancia física expresada en microsegundos (μs). Esta función permite calcular los caminos más cortos con menor retardo de propagación. Finalmente para el caso de obtener las longitudes de onda disponibles y realizando las siguientes consideraciones se tiene que:

- Sea E el conjunto de enlaces (i,j) de la red en estudio.
- λ_{ij}^{a} es el número de longitudes de onda **disponibles** en un enlace.
- λ_{ij}^{T} denota el número **total** de longitudes de onda en el enlace.

Entonces el cálculo del peso del enlace se presenta en la ecuación 1.1.

$$w_{ij} = \begin{cases} -\log\left(1 - \frac{1}{\lambda_{ij}^{a}}\right) & \lambda_{ij}^{a} > 1, \forall (i,j) \in E \\ 1 & \lambda_{ij}^{a} \leq 1, \forall (i,j) \in E \end{cases} \quad (1.1)$$

$\frac{1}{\lambda_{ij}^{a}}$ es la medida de la resistencia que un enlace ofrece para establecer una sesión.

Con la ecuación 1.1 y realizando una gráfica en Matlab™ se obtiene la figura 1.23 donde se aprecia, como era de esperarse, la disminución del peso del enlace (menor dificultad para establecer un enlace y menor bloqueo) con el aumento de las longitudes de onda disponibles por enlace, esta gráfica se constituye en un elemento esencial cuando se busca una forma de mejorar la probabilidad de perdida de ráfagas en una red OBS, sin embargo se debe tener en cuenta que cada lambda que se aumenta en el enlace implica mayores costos (CAPEX y OPEX) en la implementación de la red. Se debe buscar un equilibrio al momento de asignar longitudes de onda y optimizar su empleo, es decir lograr el máximo número de conexiones con las longitudes de onda disponibles por ruta.

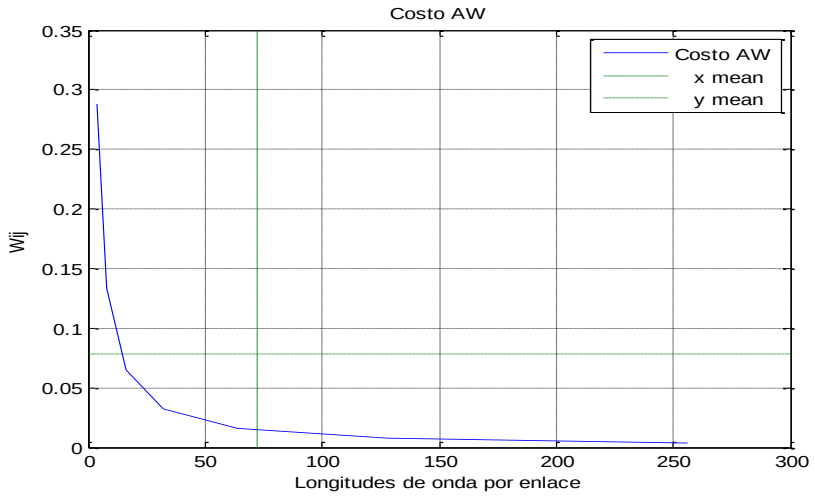


Figura 1.23. Grafico del costo AW para $\lambda_{ij}^{a} > 1$

La asignación de longitud de onda, WA, puede realizarse de forma paralela a la de encaminamiento, R, o bien simultáneamente. En seguida se hace una semblanza de

las técnicas clásicas de asignación de longitud de onda, WA para la transmisión a través de un medio físico ideal. Para la realización de WA el conjunto de longitudes de onda disponibles (no asignadas) se ordena, en general, bajo alguna política. También puede adoptarse un criterio de no ordenación. De esta forma las principales estrategias WA incluyen criterios como:

- **Ordenar las longitudes de onda**: por el instante en que se usaron por última vez de manera RR (*Round-Robin*).
- **Elección aleatoria**; es decir, no se ordenan las longitudes de onda y se selecciona una de ellas aleatoriamente.
- Expandir o contraer en el espectro las longitudes de onda utilizadas a través de los enlaces.

La conveniencia de un algoritmo de WA respecto a otro depende de factores como:

- La topología de la red (redes en anillo frente a redes malladas, con mayor o menor grado de conectividad).
- La carga de la red (relación entre las longitudes de onda utilizadas frente a las disponibles).
- El objetivo deseado: retardo máximo requerido, recursos de red disponibles, probabilidad de bloqueo máxima impuesta, equilibrio entre retardo computacional y prestaciones.

La selección de la longitud de onda se puede hacer teniendo en cuenta o no el estado de la red. Entre los métodos más empleados para asignación de longitudes de onda WA (*Wavelength Assignment*) se tiene los siguientes:

- **Aleatorio (*Random*):** selecciona aleatoriamente la longitud de onda a comprobar.
- **Fijo FF (*First Fit*):** selecciona la primera longitud de onda disponible. Se busca maximizar la reutilización de las longitudes de onda.
- **Menos usada LU (*Least-Used or Spread*):** selección de la longitud de onda menos utilizada de la red. Se usa balanceo de carga.
- **Más usada MU (*Most Used or Pack*):** selección de la longitud de onda más utilizada.

- **Producto mínimo MP (*Min – Product*):** Selecciona la longitud de onda que minimiza el producto del número de fibras en las que dicha longitud de onda ya está asignada en un enlace, para todos los enlaces que constituyen la ruta seleccionada. Este mecanismo se aplica en redes multifibra y permite balanceo de la carga además de minimizar la probabilidad de bloqueo.
- **Menos cargada LL (*Least – Loaded*):** sobre el enlace más cargado de la ruta, selecciona la longitud de onda con mayor número de unidades disponibles. Se aplica en redes multifibra. Este mecanismo permite descongestionar el enlace más cargado y además minimiza la probabilidad de bloqueo.
- **Reserva de longitud de onda RSV (*Wavelength Reservation*):** reserva de longitudes de onda en los enlaces para conexiones de tipo multisalto con pares origen destino conocidos de forma que no puedan emplearse en otros pares origen-destino incluso estando desocupadas. Minimiza la probabilidad de bloqueo en conexiones multi-salto, mientras que aumenta la probabilidad de bloqueo en conexiones monosalto. Requieren la combinación con otra técnica WA.

El objetivo de los algoritmos definidos para resolver el problema de asignación de longitudes de onda es reducir el bloqueo global de la red y reducir la probabilidad de bloqueo en conexiones de más de un salto. Igualmente, las técnicas LU, MU, MP, LL, requieren una visión global del estado de la red.

La información de estado de la red debe ser actualizada frecuentemente para asegurar la precisión de cálculos, de forma similar a un encaminamiento en función del estado de enlace. La tabla 1.8 muestra un resumen de los esquemas propuestos para la solución del problema R+WA.

Problemas		**Aproximaciones**	**Comentarios**	**Referencias**
RWA estático		Formulación ILP	NP completo	(Mukherjee 1997)
Encaminamiento - **R** (*Routing*)		Formulación ILP	NP completo	(Mukherjee 1997)
		FR, Fixed routing *AR, Alternate routing*	Incrementan desempeño y complejidad	(Bhide, Sivalingam & Fabry-Aztalos 2001)
		Adaptive routing		
Asignación de Longitudes de Onda	WA conociendo conexiones y rutas	Coloreado de grafos	NP - completo	(Mukherjee 1997)

WA (*Wavelength Assignment*)	WA+FR	LU RANDOM MP (multi fibra) FF MU (Pack) LL (multi fibra) MΣ RCL	Heurísticas y aproximaciones	(Birman & Kershenbaum 1995)
	WA+Adaptive Routing	DRCL (*Distributed Relative Capacity Loss*)	Combinado con *adaptive routing*	(Zang & Jason 2000)
	Otros algoritmos WA	RSV THR	Combinado con otros algoritmos WA	(Birman & Kershenbaum 1995)

Tabla 1.8. Resumen de esquemas para resolver el problema RWA

En la solución del problema de R+WA se proponen diferentes estrategias con combinan las técnicas para R y para WA enunciadas hasta ahora. Igualmente en muchos trabajos se propone la solución conjunta de RWA y sin el empleo de convertidores de longitudes de onda. De esta forma el problema es más complejo especialmente cuando el tamaño de la red aumenta, a pesar de esto las soluciones propuestas pueden dar mejor resultados. Stern & Bala (2000), Bouillet *et al.* (2002), Ramaswami, Sivarajan & Sasaki (2010), Wauters & Demeester (1996) y Saad & Luo (2005), entre otros se encuentran soluciones para RWA conjunto, en algunos con encaminamiento dinámico y estático, y en redes mono fibra y multifibra.

Finalmente se reitera que la mayoría de los métodos propuestos para la solución del problema RWA han sido abordados considerando que a nivel físico la transmisión de la señal óptica se hace sin error, sin embargo los efectos sobre la fibra pueden afectar la calidad de los *lightpaths* (ver tabla 1.4), existen una serie de trabajos de investigación (Lázaro 2010) donde se propone que no se pueden asignar longitudes de onda a los *ligthpaths* sin antes superar criterios de calidad en el establecimiento de las conexiones. Asimismo, en muchos trabajos se trata de solucionar el problema RWA en conjunto con la elección de topologías de red lógicas a embeber sobre topologías físicas, dependiendo de la función objetivo, del tipo de variables y las restricciones presentes, se plantean las siguientes formulaciones y algunas referencias de trabajos publicados que las tratan:

- Formulaciones de programación no lineal NLP (*Non Linear Programming*) cuando la función objetivo y/o las restricciones no son funciones lineales. Mukherjee *et al.* (1996) plantean el objetivo de minimizar la congestión de su formulación NLP completo por medio del recocido simulado (*Simulated Annealing*)[18] y el método de desviación de flujo. Igualmente, Saha & Mukhopadhyay (2008) proponen el uso de algoritmos genéticos en lugar del recocido simulado, se obtienen mejores resultados en lo relacionado con el factor de escalabilidad como el tiempo de espera en los nodos. Otros autores proponen el uso de conversores de longitudes de onda y diferentes heurísticas para la maximización del tráfico mono salto (Banerjee & Mukherjee 2000).

- Formulaciones de programación lineal LP (*Linear Programming*) cuando la función a optimizar y las restricciones son lineales y las variables son números reales. Ramaswami & Sivarajan (1996) se trabaja el problema anterior como un LP, permitiendo que las variables que determinan si hay un camino de luz entre dos nodos tomen valores reales (y no solo binarios). Con estos elementos al fijar las variables se convierte en un problema LP y al solucionarlo se obtiene como encaminar el tráfico y el valor de la congestión.

- Formulaciones de programación lineal entera ILP (*Integer Linear Programming*) son casos particulares de las formulaciones LP cuando las variables que definen las relaciones son números enteros. Banerjee, Yoo & Chen (1997) plantean una formulación ILP con el objetivo de maximizar el tráfico mono salto como método para minimizar la congestión.

- Formulaciones de programación lineal entera mixta MILP (*Mixed Integer Linear Programming*) son casos particulares de las formulaciones LP en las que algunas variables son números reales y otras son enteras. Ramaswami & Sivarajan (1996) se plantea una solución conjunta de los problemas de conectividad y encaminamiento del tráfico. Igualmente, Huiban & Mateus (2005) proponen un estudio profundo sobre el problema de reconfiguración en redes WDM (Wavelength Division Multiplexing), el cual consiste en definir cómo adaptar el nivel óptico a cambios en los patrones de tráfico.

---

[18] Recocido simulado SA (*Simulated Annealing*) se refiere a un algoritmo de búsqueda de tipo Meta heurística para problemas de optimización global (se busca encontrar el óptimo global), en el anexo 2 se describen diferentes técnicas de optimización entre ellas el Recocido Simulado.

Durán (2008) incluye un análisis sobre las diferentes publicaciones que se han hecho para solucionar este problema de las diferentes formulaciones presentadas, asimismo, muestra el desarrollo de temas como los procesos de reconfiguración de redes ópticas mediante algoritmos genéticos. Debido a esto, solo se hace una corta referencia a los mecanismos para diseño de topologías lógicas para optimizar el encaminamiento en redes ópticas WR.

La elección de la topología lógica óptima a embeber en la topología física depende de distintos objetivos entre ellos: minimizar el retardo medio de extremo a extremo experimentado por los paquetes como se plantea en Mukherjee *et al.* (1996), aunque su aplicación se limita a redes de pequeño tamaño. Bannister, Fratta & Gerla (1990) emplea la técnica de recocido simulado para minimizar la distancia media recorrida por los paquetes. Otro objetivo es minimizar la congestión, en Labourdette & Acampora (1991) proporcionan una formulación MILP para una solución conjunta de conectividad y encaminamiento de tráfico. Igualmente, en Gazen & Ersoy (1998) proponen un algoritmo genético para solucionar el problema de la conectividad.

Muchas de estas técnicas tienen la capacidad de encontrar la solución óptima dependiendo de las restricciones que le sean impuestas tienen dos problemas fundamentales. El primero de ellos consiste en el hecho de no poder expresar todas las restricciones como funciones lineales. Igualmente, el proceso de encontrar las soluciones es demasiado lento en redes con tamaños medios o grandes. Como soluciones a estos problemas se pueden realizar simplificaciones a las respectivas formulaciones, el empleo de heurísticas o metaheurísticas[19] como soluciones es una buena alternativa.

Las heurísticas o metaheurísticas como el recocido simulado, los algoritmos genéticos o la búsqueda tabú. Presentan la ventaja de poder encontrar una solución al problema en un tiempo menor aunque no se tiene certeza que sea la solución óptima. Aunque esto depende la rigurosidad en el diseño del algoritmo. Ramaswami & Sivarajan (1996) proponen diferentes heurísticas que resuelven el problema de diseño de la topología lógica y el problema de RWA.

[19] Este tema se aborda en el capítulo 3 y en el anexo 5 del presente documento.

- HLDA (*Heuristic for Logical topology Design Algoritm*), selecciona el par de nodos origen – destino con mayor tráfico y establece un camino de luz entre dichos nodos por el camino de menor retardo sobre la primera longitud de onda disponible. Esta operación solo se lleva a cabo si en el nodo de origen existe un transmisor libre y en el nodo destino existe un receptor libre. Este proceso se repite hasta establecer el número de caminos de luz deseado (se propone un algoritmo en cuatro pasos).

- MLDA (*Minimum-delay Logical topology Design Algorithm*), es un método que puede emplearse si el grado lógico es mayor que el grado de la topología física. Se comienza estableciendo caminos de luz entre nodos adyacentes y los restantes hasta completa el grado lógico de cada nodo se establecen según HLDA. De esta forma las topologías lógicas creadas son capaces de encaminar todos los paquetes sobre el trayecto físico más corto entre cada par de nodos y además es capaz de satisfacer las restricciones de retardos que son físicamente realizables, de aquí el termino retardo mínimo (*Minimum delay*).

- TILDA (*Traffic Independent Logical topology Design Algorithm*), se diseña topologías lógicas sin emplear la matriz de tráfico, comienza estableciendo caminos de luz de dos, tres y más saltos sucesivamente, este algoritmo busca disminuir el número de longitudes de onda requeridas y es una buena alternativa cuando no se conoce el tráfico o es uniforme.

- LPLDA (*Linear Programming Logical topology Design Algorithm*), se considera la solución obtenida por una relajación de un problema MILP propuesto con anterioridad.

- RLDA (*Random Logical topology Design Algorithm*), coloca al azar los enlaces lógicos, con el fin de encontrar un *ligthpath* para cada nodo de borde sin violar sus restricciones, al mismo tiempo que no se tiene en cuenta la matriz de tráfico.

En este trabajo sobre la topología de red NSFNET muestra que HLDA es la heurística que requiere mayor número de longitudes de onda (ver figura 1.24), pero teniendo en cuenta la matriz de tráfico por lo que obtiene menores valores para la congestión. Igualmente Ramaswami, Sivarajan y Sasaki (2010) se presentan

ejemplos sobre solución a estos problemas. Se han propuesto otros métodos para el diseño de topologías lógicas en entornos reconfigurables en lugar de emplear entornos estáticos, ejemplos se encuentran en Banerjee y Mukherjee (2000), Gencata & Mukherjee (2003), Zheng, Zhou & Mouftah (2004), Prathombutr (2003), entre otros.

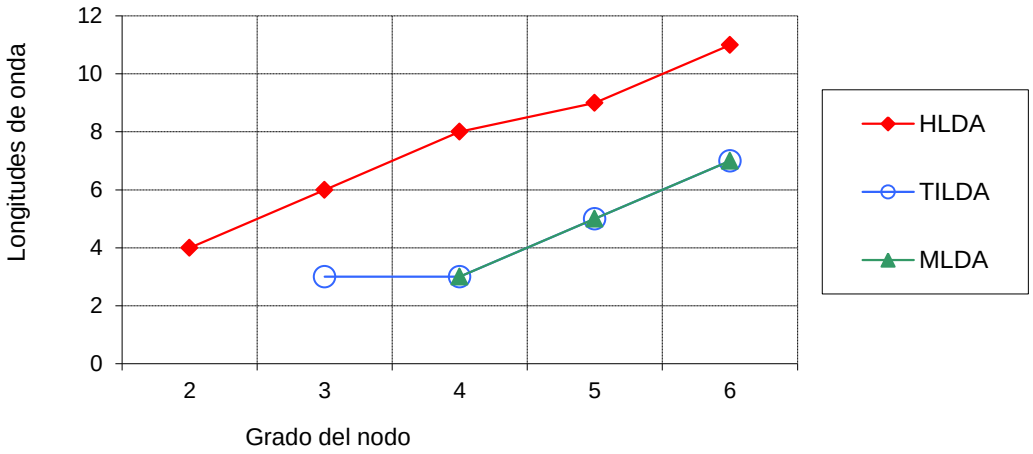


Figura 1.24. Comparación entre algoritmos HLDA, TILDA y MLDA

Finalmente se tiene en cuenta que minimizar el costo, es el tercer objetivo a lograr, aunque este aspecto puede ser difícil de modelar. En Konda & Chow (2001), Banerjee, Yoo & Chen (1997) y Cinkler *et al.* (2000) se aborda este problema desde diferentes perspectivas.

Se recuerda que al ser RWA un problema NP-Hard, en esta Tesis se aborda su estudio mediante AG y AG + Cognición, esto se hace debido a la incidencia que tiene este problema sobre el desempeño de la redes ópticas en este caso en las redes OBS.

- **Infraestructura de núcleo OBS (Nodos Centrales - *core nodes*)**

Los nodos centrales se encuentran en el núcleo o *core* de la red OBS, permitiendo la conmutación de ráfagas de datos transparente sobre fibra óptica mediante la

configuración de la matriz de conmutación del equipo para que la ráfaga salga por el puerto adecuado, su arquitectura se muestra en la figura 1.25.

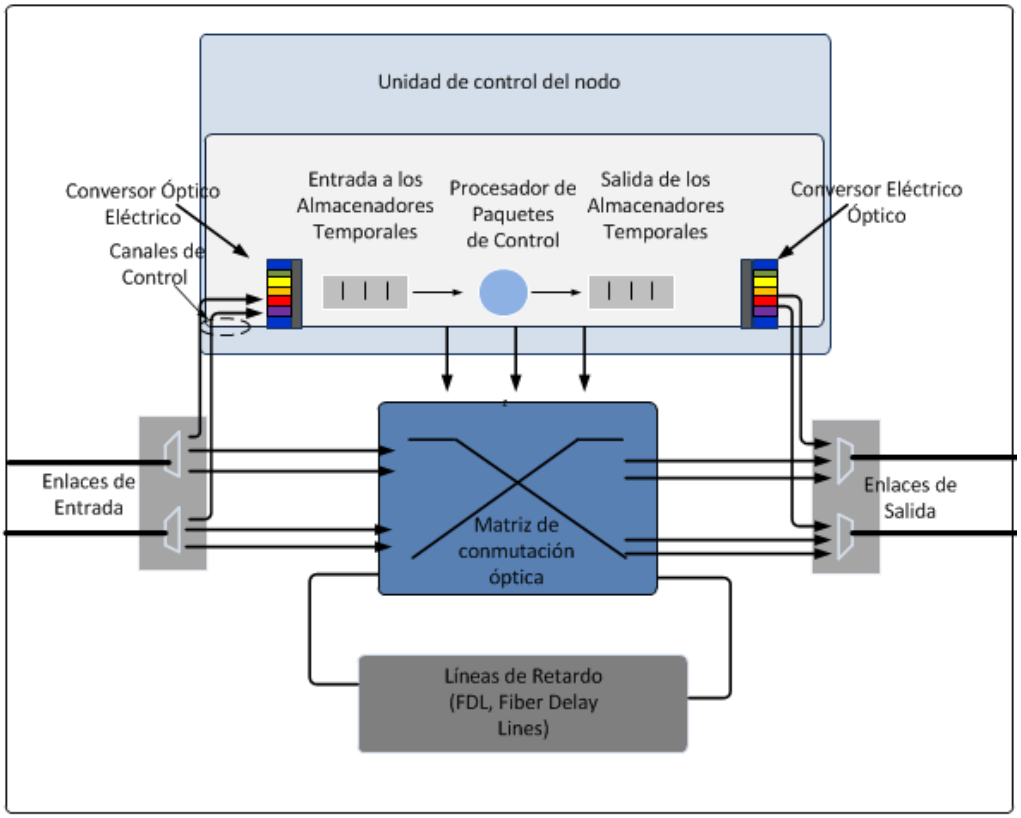


Figura 1.25. Arquitectura de un nodo de núcleo

Un elemento importante en el nodo central, es la matriz de conmutación óptica, que permite la conmutación de las ráfagas de una fibra de entrada a una de salida. Dicha matriz se modifica automáticamente desde la unidad de control al igual que su velocidad, lo cual es clave para lograr una buena utilización del canal; otros elementos importantes en el nodo central son los conversores óptico-electrónicos ya que el reconocimiento y manejo de los paquetes de control se realiza en el dominio electrónico y la información contenida en dichos paquetes es necesaria para procesos de señalización, como planificación de ráfagas de datos y solución a problemas de contención, llevados a cabo en la unidad de control del nodo (Maier 2008; Jue & Vokkarane 2005).

En cuanto a funcionalidad y de acuerdo con la figura 1.18 las funciones principales de los nodos centrales son la planificación de recursos y la resolución de contención (sin olvidar el procesamiento del BCP).

- **Planificación de recursos**

Como se observa en la figura 1.15 cada paquete de control o BCP contiene información sobre las ráfagas (por ejemplo *offset* y longitud de la ráfaga). Con base en esta información los nodos OBS planifican los recursos dentro de los conmutadores locales de tal manera que las ráfagas puedan pasar a través de ellos. Los esquemas de planificación de recursos propuestos para las redes OBS se clasifican de acuerdo con los tiempos de comienzo y fin de ocupación de los recursos por parte de las ráfagas, dicha clasificación es la siguiente (Maier 2008):

- **Establecimiento explícito (*explicit set up*)**: en este caso, se reserva una longitud de onda y el conmutador es configurado inmediatamente después que recibe y procesa el BCP.

- **Establecimiento estimado (*estimated set up*)**: la reserva de una longitud de onda se retarda y mediante el uso de la información provista por el BCP el nodo OBS puede estimar el tiempo de arribo de la ráfaga correspondiente. Una longitud de onda es reservada y se configura el conmutador antes que se cumpla el tiempo estimado de arribo de la ráfaga.

- **Liberación explícita (*explicit release*)**: en este caso los nodos de borde envían un tráiler adicional al BCP para indicar el fin de la ráfaga. Después de esto el nodo OBS libera la longitud de onda.

- **Liberación estimada (*estimated release*)**: en este caso el nodo OBS estima el fin de la ráfaga empleando la información del tiempo offset y el tamaño de la información transportada en el BCP. Con esta información un nodo OBS puede estimar el tiempo cuando liberar la longitud de onda luego que la ráfaga ha pasado por el conmutador respectivo.

Existen cuatro posibilidades para combinar estos esquemas de planificación de recursos: establecimiento-explícito / liberación-explícita, establecimiento-explícito / liberación-estimada, establecimiento-estimado / liberación-explícita y establecimiento estimado/liberación-estimada.

La selección del esquema de planificación de recursos depende del algoritmo de ensamble empleado. Por ejemplo: si un nodo de borde envía una ráfaga una vez que esta se ha ensamblado completamente, y cuando el BCP llega a un nodo con los datos sobre el *offset* y el tamaño de la ráfaga utiliza esta información para la selección del esquema de configuración y liberación estimadas. Mientras que si el BCP se envía antes de que la ráfaga esté completamente ensamblada, entonces el nodo OBS no va a poder decidir que esquema emplear (en este caso, se debe enviar un paquete tipo tráiler que indique el final de la transmisión de la ráfaga).

- **Resolución de Contención**

La resolución de contención es uno de los principales objetivos de diseño en las redes OBS, ésta se presenta cuando una ráfaga llega a un nodo OBS y todos los recursos están ocupados o cuando dos o más ráfagas requieren simultáneamente un mismo recurso (Anan, Chaudhry & Benhaddou 2006), (Chaing *et al.* 2007), (Maier 2008) y (Germoni *et al.* 2011).

Las técnicas de resolución de contención pueden ser aplicadas en los dominios del tiempo, de espacio, de longitud de onda o cualquier combinación de los anteriores. Cuando dos o más ráfagas contienden en un nodo, esta se puede resolver empleando líneas de retardo de fibra FDL (*Fiber Delay Lines*), donde se retrasan las ráfagas y posteriormente se envían secuencialmente a las salidas.

Aunque las FDL son costosas, se requieren grandes extensiones físicas de fibra óptica y permiten que la información esté disponible en todo momento, son un mecanismo aceptado. Igualmente, se puede controlar la contención mediante la deflexión de rutas o también conocido como el método *hot potatoe* (o papa caliente), esto significa que una de las ráfagas utiliza el puerto de salida causante de la congestión y las demás ráfagas se envían por rutas alternativas. Asimismo, el

empleo de conversores de longitudes de onda permite que las ráfagas en contención puedan enviarse en longitudes de onda diferentes.

La tabla 1.9 muestra una clasificación de los diferentes esquemas de resolución de congestión incluyendo la segmentación de ráfaga que implica dividirla en segmentos y encaminarlos por diferentes rutas. Igualmente, se han propuesto diferentes mecanismos de control de contención que dependen de las implementaciones que se desean llevar a cabo.

Esquema	Ventajas	Desventajas
Conversión de longitudes de onda	Baja perdida de ráfagas	Tecnología costosa
Almacenamiento FDL	Tecnología simple y madura	Causa pérdida de potencia y produce ruido
Deflexión de ruta	No se requiere hardware extra	Información fuera de orden e inestable
Segmentación de ráfaga	Alta eficiencia y baja perdida de ráfagas	Tecnología inmadura, alta complejidad, retardo y señalización extra

Tabla 1.9. Comparación de distintos esquemas de resolución de contención (Anan, Chaudhry & Benhaddou 2006)

Otros métodos implican el uso de mecanismos de *preemption* donde se analizan las prioridades de las ráfagas en los nodos (Monoyios & Vlachos 2008).

- **Procesamiento del BCP**

Esta función se lleva a cabo en la Unidad de Control como se muestra en la figura 1.23. Según se ha estudiado, en las redes OBS se realiza una separación entre las señales de datos y de control, por cada ráfaga de datos se transmite un paquete de control de ráfaga o BCP el cual se envía en un canal de control dedicado, este paquete contiene un encabezamiento que incluye información sobre la longitud de la ráfaga respectiva, tiempo *offset*, calidad de servicio (si está disponible), identificación de la longitud de onda, identificación de puertos de entrada entre otros (ver figuras 1.15 y 1.16 del presente capítulo).

Este BCP es significativamente más pequeño que el tamaño de la ráfaga, en Oh & Kang (2002) se patenta un BCP de 72 bits de longitud, por lo cual un solo canal es

suficiente para transportar los paquetes de control asociados con múltiples canales de datos. Como se observa en la figura 1.26 el paquete de control viaja a través de la red teniendo conversiones O/E/O en cada nodo intermedio de la red OBS y es procesado electrónicamente lo que permite configurar el conmutador para que cuando llegue la ráfaga pueda encontrar la salida hacia el próximo nodo de forma transparente.

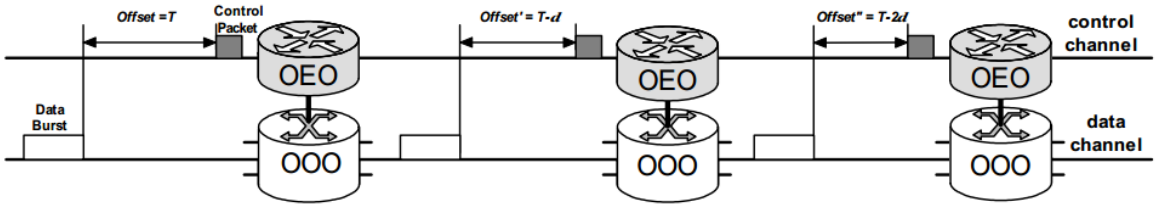


Figura 1.26. Separación en plano de datos y plano de control en una red OBS (Cheng, Qiao & Yu 2004)

Asimismo, como se observa en la figura 1.27 para poder realizar el proceso de reserva de recursos para la ráfaga entrante hay un tiempo offset el cual es la diferencia entre el tiempo final del paquete de control y el tiempo de comienzo de la ráfaga en el nodo de ingreso, este tiempo permite compensar los retardos de procesamiento y configuración del conmutador.

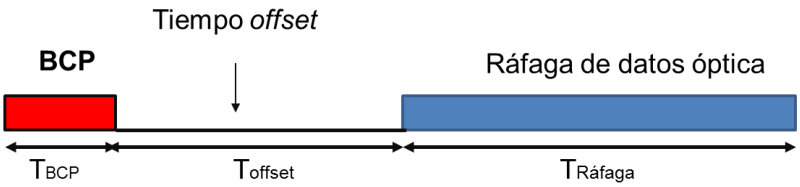


Figura 1.27. Relación temporal entre el BCP y la ráfaga de datos

El tamaño del *offset* debe ser tal que permita la configuración del camino óptico para la ráfaga desde el nodo fuente hasta el nodo de destino, igualmente, este tiempo puede considerarse como el tiempo de vida TTL (*Time To Live*) del BCP ya que en la medida que pasa a través de la red este tiempo va disminuyendo (en un valor d, según la figura 1.25), si esto sucede antes de llegar al destino la ráfaga se descarta. Si el valor del *offset* es suficientemente grande, la ráfaga de datos puede ser conmutada completamente en el dominio óptico de una forma directa (*cut-through*) sin tener que esperar en los nodos intermedios (de forma O/O/O) es decir sin requerir

almacenamiento en los nodos (sin empleo de memorias RAM apticas o FDLs). Además, la granularidad que se presenta a nivel de ráfaga se debe a la ganancia en la multiplexación estadística lo cual no se presenta en otras tecnologías como OCS (Klinkowski 2007).

Igualmente, invocando de nuevo el hecho de la separación entre los paquetes de control y las ráfagas de datos se propone un modelo de red con dos planos. Un plano de control opto electrónico y un plano de datos completamente óptico, los cuales pueden verse como dos planos paralelos, como se muestra en la figura 1.28. Si existe congestión en los recursos se pueden perder tanto la ráfaga de datos como los BCP, sea lo que suceda la ráfaga se pierde. Tanto los mecanismos para resolución de contención de ráfagas como los algoritmos de planificación tienen que ver con el problema de congestión que pueda presentarse en el plano de datos (Xiong, Vandenhoute & Cankaya 2000).

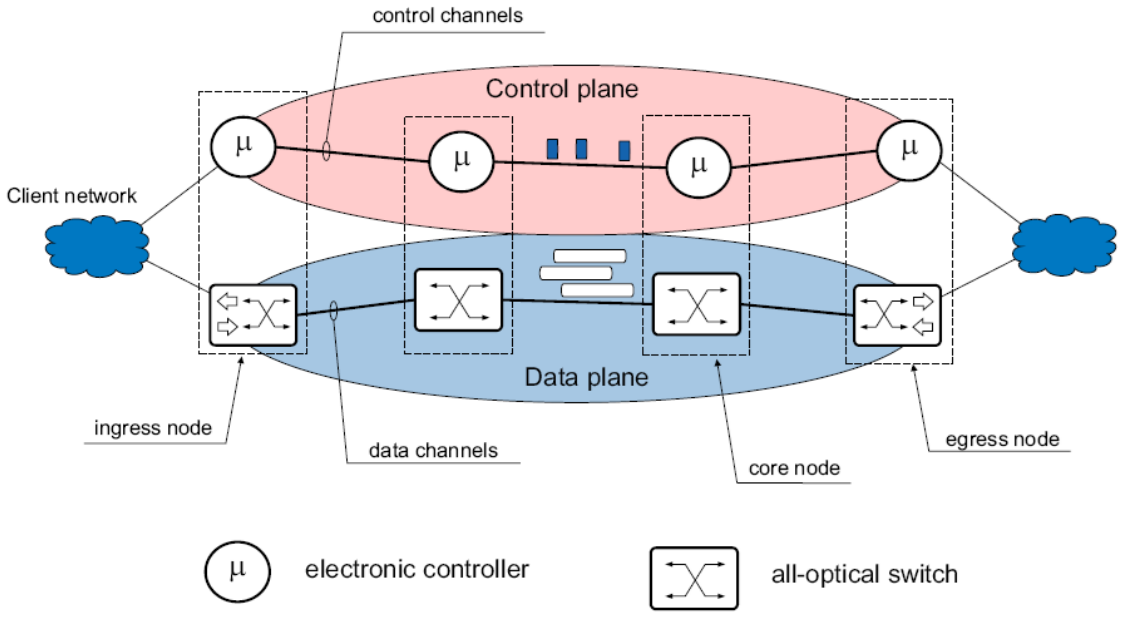


Figura 1.28. Planos de control y de datos en OBS (Klinkowski 2007)

El plano de control propuesto está influenciado por varios factores entre ellos: La arquitectura de la red, arquitectura del nodo de control (esta puede centralizada o distribuida), las funciones y algoritmos, las tecnologías de procesamiento, la disciplina de la cola, otros parámetros relacionados con el plano de datos y las características del tráfico de control de ráfaga.

Se deduce que la configuración del BCP tiene una incidencia directa sobre el desempeño de la red, igualmente sucede con su adecuado procesamiento. Desde el momento en el cual el BCP llega al nodo (se asume un arribo con distribución Poisson) es afectado por los mecanismos empleados en el dominio electrónico para su proceso, diferentes autores proponen un modelo en cola (*Queueing model*) tipo M/M/1 con buffer infinito o M/D/1/k con buffer finito de un procesador electrónico de encabezamientos que se encuentra en el plano de control en un nodo del *core* de una red OBS.

Lo anterior implica que los BCP entrantes que acaban de tener una conversión O/E primeramente son almacenados en una cola y son atendidos por un servidor con mecanismo de atención FIFO (*First In First Out*) como lo ilustra la figura 1.29. Posteriormente se procesa (se atiende) y se configura el conmutador, luego se envía al siguiente nodo mediante una conversión E/O, y así sucesivamente para todo el recorrido.

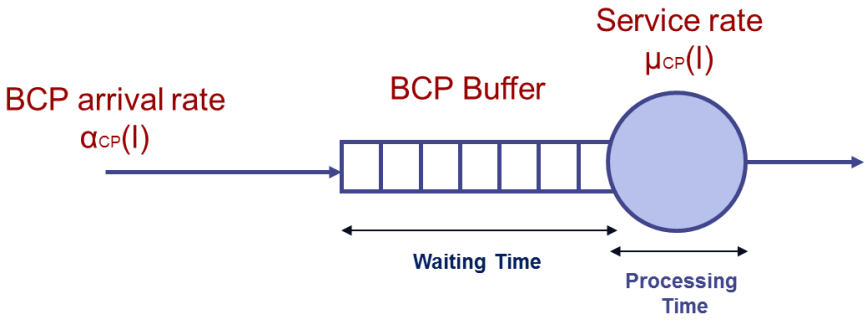


Figura 1.29. Modelo de cola para el BCP

Al presentarse congestión se puede causar la descompensación del plano de control y la correspondiente pérdida de encabezamientos mientras espera en la cola, esto puede causar el denominado cuello de botella electrónico (*electronic bottleneck*) en redes OBS.

Como se ha venido mencionando, en el Capítulo 2 se hace un análisis con mayor detalle de los aspectos relacionados con el BCP y su tratamiento temporal, su relación con los mecanismos de planificación y su procesamiento y configuración. Igualmente se incluyen temas como diferenciación de servicios, mecanismos de protección y variantes de OBS como LOBS (*Labeled OBS*) y WROBS (*Wavelength-Routed OBS*), aunque no se incluye su estudio, existe una variante de OBS

denominada DOBS (*Dual Header OBS*) que busca emplear encabezamientos duales para corregir posibles problemas de reserva de recursos, entre otros aspectos.

1.4.5. Comparación OCS, OBS y OPS

Las diferentes alternativas de conmutación para redes ópticas han sido objeto de muchos estudios comparativos desde diferentes perspectivas, en seguida se hace un recuento de trabajos desarrollados desde hace algunos años y que muestran resultados principalmente entre OCS y OBS. Algunos autores cuentan con cifras elevadas sobre las horas de simulación requeridas para la evaluación de redes OBS, este elemento sumado al hecho del aumento de costo en su implementación y la posibilidad de colapsar, hace que muchas empresas le sigan apostando a OCS ya conocido. Sin embargo, los esfuerzos conducen al empleo de OBS como posible reemplazo de OCS hasta que OPS demuestre sus bondades en la práctica.

En la búsqueda de publicaciones sobre comparación entre OCS, OBS y OPS se encuentran muchos títulos, debido a esto y la importancia que implica actualmente, se hace una revisión de algunos trabajos al respecto. El objetivo central de esta sección es facilitar argumentos para considerar una u otra tecnología como posible esquema de futuros trabajos de investigación.

OBS y su granularidad por sub longitudes de onda brindan la opción de hacer uso más eficiente del ancho de banda de transmisión óptica que la propuesta de OCS. Igualmente, la opción de resolver problemas de congestión sin el uso de búferes ópticos es un elemento fundamental en su comparación con OCS dado que además de no requerir almacenamiento intermedio para las ráfagas las transmite en el dominio completamente óptico evitando conversiones de señal O/E/O.

Existen estudios sobre la comparación entre OCS y OBS tomando elementos como costo/beneficio, aspectos cuantitativos y cualitativos, manejo de grandes volúmenes de tráfico manteniendo una probabilidad de pérdida de ráfagas razonable. En seguida se hace una semblanza de diferentes pruebas hechas con OBS y sus variantes bajo diferentes escenarios tecnológicos potenciales (se toman en cuenta distintos tiempos de reconfiguración de conmutadores y tiempos de procesamiento electrónico de encabezamientos). La intención es encontrar límites superiores en el

desempeño respecto a la perdida de ráfagas y que puedan ser alcanzados asumiendo elementos razonables de diseño para redes OBS. Para el caso de OCS, se emplean las matrices de tráfico como entradas a los diferentes algoritmos heurísticos de planeación y de esta forma encontrar una solución al problema de planeación multinivel.

Los anteriores elementos se han incluido buscando tener ventajas sobre los sistemas que necesitan hacer conversiones O/E/O en los cuales todo el tráfico es procesado electrónicamente salto a salto y paquete a paquete. En seguida se hace un resumen de algunas ventajas de OBS.

1. Se requiere de menos conversiones O/E/O, ahorrando costos de equipo y consumo de potencia.

2. La conmutación directa reduce el retardo extremo a extremo. La anticipación del encabezamiento ayuda a preservar esta ventaja aun en presencia de conmutadores ópticos lentos. En OBS, el tiempo *offset* es lo suficientemente largo para permitir la configuración de conmutador y estar listo cuando la carga útil o *payload* llega al nodo. Por lo tanto este valor de *offset* solo se adiciona al tiempo total de propagación y no en cada nodo (ni por cada salto).

3. El proceso de agregación de ráfaga demanda menos tiempo de procesamiento para el encabezamiento, además la velocidad de procesamiento de encabezamientos por segundo en cada nodo es dependiente del promedio de la duración de la ráfaga, pero no está ligado a la velocidad de línea en el plano de datos.

4. No son necesarios *buffers* ópticos para resolver la contención, debido a los mecanismos que emplea para enviar las ráfagas en el dominio óptico, estas no requieren esperar a que se configuren los nodos, las ráfagas al llegar a los nodos centrales los encuentran listos para conmutar la ráfaga y continuar hacia el nodo de destino.

Tecnológicamente, OBS no es comercial en la actualidad como en el caso de OCS, pero por los aspectos anotados anteriormente, promete ser un buen candidato para

el reemplazo de la conmutación de circuitos ópticos. En seguida se trabaja un caso de estudio que permite comparar OBS y OCS en ambiente de simulación mediante el empleo de la herramienta OMNeT++.

- **Escenario para prueba de OBS**

En esta sección se busca mostrar una serie de elementos que permiten definir escenarios de prueba cuando se trabaja e investiga con redes OBS, es importante tener en cuenta los elementos aquí tratados ya que son el resultado del análisis de diferentes propuestas hechas en la literatura, además de constituirse en un insumo valioso para el diseño de los modelos de prueba de esta Tesis.

En principio se define un modelo de red OBS compuesto por nodos y enlaces WDM con diferentes topologías, cada nodo de interconexión está unido a un nodo de frontera, donde estos últimos están equipados para ensamblar el tráfico electrónico especialmente IP (*Internet Protocol*) en ráfagas y las inyectan en la red. Igualmente, se considera que las fibras ópticas pertenecientes a cada enlace contienen el mismo número de longitudes de onda con lo cual se garantiza que se cuenta con un único conjunto (*grid*) de longitudes de onda a través de la totalidad de la red, asumir esta posibilidad es razonable en el *backbone* de la red.

Se supone que los enlaces de interconexión están compuestos por una fibra, mientras que los enlaces de los nodos de borde pueden tener una o más fibras según el requerimiento de entrada/salida de tráfico. Esto se puede asumir gracias a que los enlaces OBS son poco costosos al no requerir equipamiento adicional para su conexión a la red.

En muchos análisis donde se emplea simulación, se considera el uso de GMPLS (*Generalized Multiprotocol Label Switching*) y su plano de control, por lo tanto se consideran los siguientes aspectos:

(i) las conexiones de tráfico de los niveles altos son tomadas de los LSP (*Label Switching Paths*), los cuales se pueden establecer entre nodos de borde (enlaces *end to end*),
(ii) los nodos de borde (*edge nodes*) actúan como LERs (*Label Edge Routers*).

(iii) las ráfagas pertenecen al mismo LSP siguiendo la misma secuencia de saltos desde el nodo de ingreso hasta el nodo de salida. De acuerdo a este esquema, no se consideran técnicas de deflexión de ruta para resolver los problemas de contención. Asumiendo estos aspectos se garantiza que las ráfagas mantienen el orden de envío en la red OBS.

Para favorecer el buen desempeño en la resolución del problema de contención, el encaminamiento y la capacidad de cada LSP se calcula para resolver el problema de flujos *multicommodity* (Bertsekas 1998), igualmente, se emplea la técnica de ingeniería de tráfico tipo optimización *minimax* donde el desempeño de la perdida de tráfico está dominado por la utilización del enlace. El tráfico entre dos nodos de borde puede ser dividido para tomar diferentes rutas y permitir un mejor balance del tráfico en la red OBS. Se busca mediante simulación obtener una ruta óptima.

- **El nodo de borde OBS (*edgeNode*)**

Para un modelo GMPLS como plano de control para OBS (Pedroso *et al.* 2008) se propone la estructura del nodo de borde como lo muestra la figura 1.30 en la cual se observa como L_n y L'_n el número de LSPs que inician y terminan en un nodo *n* respectivamente. La demanda de tráfico se supone que está compuesta de paquetes IP que son clasificados y enviados a uno de los LSPs correspondientes asociados con el nodo de destino del paquete. De esta forma los paquetes son ensamblados en ráfagas. Las ráfagas abandonan los ensambladores y son almacenadas en una cola en el dominio electrónico, separadas para cada LSP, esperando su turno para ser transmitidas. Una vez las ráfagas han alcanzado un nodo objetivo son convertidas de nuevo al dominio electrónico y se desensamblan.

Para cada nodo de borde *n*, el número de transmisores electro-ópticos *Tn* debe ser suficiente para garantizar el transporte de la totalidad de tráfico ingresado al nodo. El dimensionamiento de este número de transmisores representa uno de los principales beneficios del paradigma OBS. Ya que los transmisores son compartidos por todos los LSPs, se alcanza ganancia de multiplexación lo que permite un alto promedio de utilización de la piscina de transmisores sin una excesiva penalización del tiempo promedio de inyección electrónica. En algunos cálculos, el promedio de uso es del 80%. Una fracción de los transmisores es *rounded up*. El retardo de ingreso

promedio resultante y los requerimientos de memoria observados en los nodos de borde se presentan dentro de los valores aceptables.

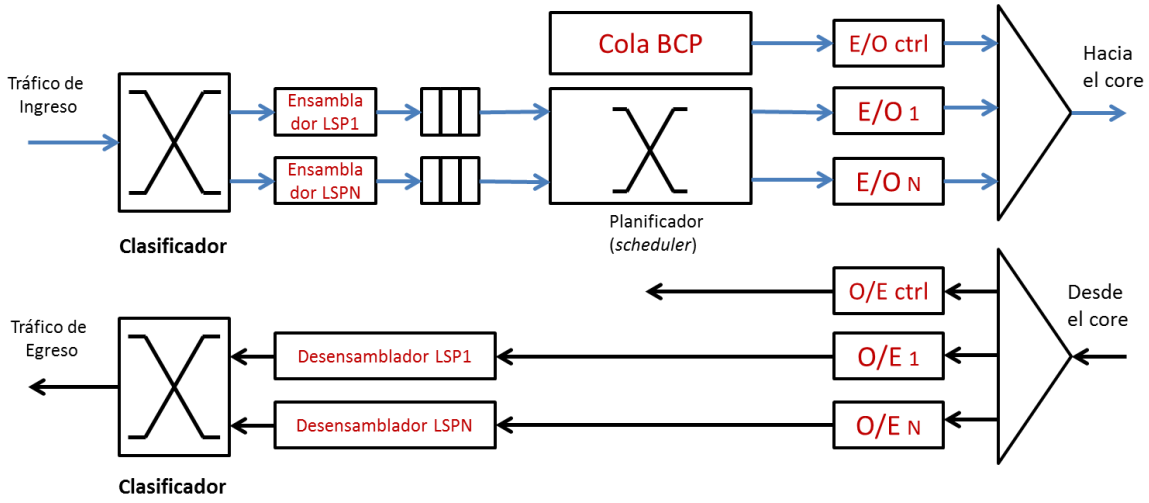


Figura 1.30. Modelo de nodo de borde OBS con elementos MPLS

Desafortunadamente, el número Rn de receptores en el nodo de borde n no se beneficia del efecto de ganancia debido a la multiplexación ya que las ráfagas entrantes compiten por las longitudes de onda en el último salto sin contar con buffers ópticos. Para mantener el desempeño en la pérdida de tráfico OBS se supone la presencia de infinitos receptores en los nodos. Estos son organizados en una lista ordenada de tal manera que un receptor se emplea solo si el anterior está ocupado. Estos aspectos permiten al final de la simulación calcular el número mínimo de receptores para el cual la probabilidad objetivo está garantizada. Este valor se puede usar en el análisis del costo de la red.

- **Proceso de ensamble de ráfagas**

En la actualidad se cuenta con diferentes mecanismos para ensamble de ráfagas en los nodos frontera, estos se basan en tiempo o volumen (longitud). En general la distribución del tamaño de la ráfaga depende del escenario de tráfico y la estrategia de ensamble específico. En algunos escenarios se puede definir el proceso de salida como una secuencia de ráfagas con una carga útil de duración aleatoria independiente seguida de una distribución normal truncada, y un tiempo entre arribo exponencial independiente. Se pueden definir valores para la longitud de la ráfaga

iguales a 1, 100 y 50.5 veces el tiempo de reconfiguración de un conmutador óptico. En una red OBS el anterior parámetro determina el gap entre ráfagas, este aspecto es necesario para asegura que un conmutador óptico OSF (*Optical Switching Fabric*) alcanza a ser configurado. Un promedio de duración del *payload* es de 50.5 veces el OSFRT (*Optical Switching Fabric Reconfiguration Time*) significa un límite de 1/50,5 (cerca al 2%) del promedio del *overhead* en la red causado por la reconfiguración del OSF. En las redes OBS el OSFRT determina el *gap* entre ráfagas desde la cola de un *payload* y la cabeza de la siguiente, en ráfagas consecutivas que atraviesan la misma longitud de onda en cualquier fibra.

- **Protocolo para reserva**

En el nodo de borde, el tiempo de transmisión para cada ráfaga ensamblada y el transmisor a ser usado se calculan por una unidad de control electrónica dedicada (*scheduler*) cuando una ráfaga deja el ensamblador. El *scheduler* selecciona el canal de transmisión que puede acomodar el *payload* más cercano, pero teniendo en cuenta que no sea el más cercano respecto al mínimo tiempo de espera en la memoria electrónica, dado por el *offset* inicial de la ráfaga, de igual manera debe respetar el *gap* entre ráfagas en el mismo canal. El *offset* inicial de la ráfaga depende del protocolo de reserva seleccionado para la red.

Existen diferente variantes entre ellas: JET se encuentra en Qiao & Yoo (1999) y en Jue & Vokkarane (2005 cap 4); Retardo de destino único ODD (*Only Destination Delay*) estudiado en Xu, Perros & Rouskas (2003) y el protocolo de incremento de prioridad salto a salto HPI (*Hop by hop Priority Increasing*) propuesto en Kim *et al.* (2004). Como se observa, JET asigna un valor de *offset* inicial para las ráfagas el cual se reduce salto a salto debido al tiempo de procesamiento del encabezamiento en los nodos. El *offset* inicial está dado por la suma de los tiempos de procesamiento en los nodos a lo largo del trayecto (LSP) más el tiempo OSFRT (*gap*). En ODD y HPI el *offset* inicial es el valor del OSFRT.

Igualmente, se incluyen FDL en los puertos de entrada de los nodos, esto para compensar el tiempo de procesamiento del encabezamiento (para ODD) y o una sobre compensación dado que el offset de la ráfaga se incrementa salto a salto (en

HPI). En todo caso, el valor del *offset* en cada salto se mantiene más alto o igual al OSFRT para permitir el proceso de conmutación en los nodos intermedios.

- **Nodo de Interconexión o nodos centrales OBS**

Como se muestra en la figura 1.31 se cuenta con un nodo de interconexión central con N fibras de entrada y salida, y con W longitudes de onda por cada fibra, además de un enlace salida y entrada asociado a su nodo de borde. En este caso, el OSF (*Optical Fabric Switch*) conmuta de forma transparente las ráfagas ópticas que llegan desde el puerto de entrada al puerto de salida. Es posible considerar que los OSF cuentan con conversores de longitudes de onda. Si esto sucede, significa que una ráfaga que llega a cualquier fibra de entrada y cualquier longitud de onda pueden ser conmutadas a cualquier fibra de salida en cualquier longitud de onda de salida.

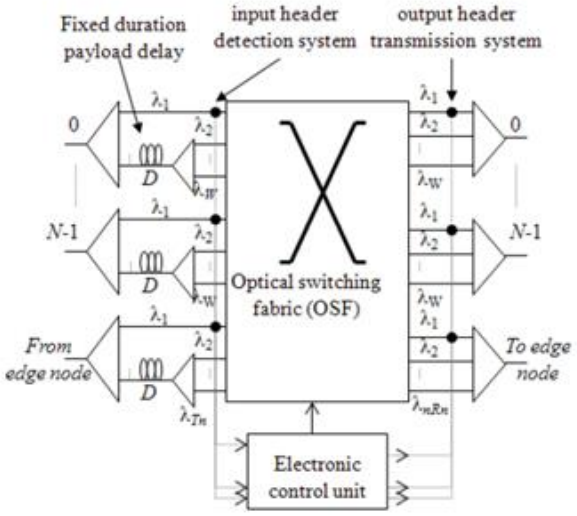


Figura 1.31. Nodo central OBS de prueba

Los BCPs entrantes son procesados por una unidad de control electrónica la cual implementa el algoritmo de planificación LAUC-VF (*Latest Available Unused Channel with Void Filling*) estudiado por Xiong, Vandenhoute & Cankaya (2000). Esta selección se encuentra respaldada por numerosos estudios donde este planificador es usado como un límite superior para medida del desempeño del conmutador respecto a la probabilidad de perdida de ráfagas. Se considera que el tiempo de procesamiento del encabezamiento de la ráfaga (T_{proc}) es constante en cada nodo para cada ráfaga. Los canales de datos en cada fibra de entrada viajan a través de

una FDL constante D = {0, T_{proc}, 1,5 T_{proc}} para JET, ODD y HPI respectivamente, estos valores son sugeridos por Kim *et al.* (2004).

La contención que se presenta entre los BHP compitiendo para ser transmitidos en el canal de control es despreciable. En entornos reales, esta clase de contención se maneja mediante la combinación de diferentes métodos, entre los que se cuentan: descarte de las ráfagas, aumentando el número de los canales de control o almacenando los encabezamientos para que esperen su turno para ser transmitidos. Cuando las ráfagas se descartan se degrada el desempeño del sistema. Lo mismo sucede cuando se incrementan los canales de control, ya que el número de canales de datos se disminuye y de la misma forma se incrementa la complejidad del sistema ya que los canales de control requieren la operación O/E/O. Finalmente, el almacenamiento del encabezamiento incrementa el tiempo de procesamiento de la ráfaga de una forma no determinística. Esto puede adicionar problemas complejos de resolver cuando se desea calcular el *offset* entre el encabezamiento y la carga útil en redes OBS reales.

En general muchos de los escenarios de simulación asumen que no existe contención en el canal de control, se asume que el tiempo de procesamiento del encabezamiento es constante.

- **Escenario de prueba para OCS**

En redes OCS la demanda de tráfico se soporta en *lightpaths* permanentes y transparentes los cuales son conmutados ópticamente en los nodos intermedios. Un *lightpath* o camino de luz (o *wavelength path*) ocupa un transmisor E/O en el nodo origen, una longitud de onda en cada fibra por la que pasa y un receptor O/E en el nodo final. La demanda de tráfico se maneja desde la parte superior de los *lightpaths* (o topologías virtuales) y estos a su vez son encaminados desde el tope de las fibras ópticas, es por esto que a estas redes se les denomina redes ópticas multinivel. Cuando se requiere pasar de un *lightpath* a otro, la conmutación se hace electrónicamente en cada nodo OCS. El éxito de OCS radica en el hecho de disminuir el costo del equipo electrónico con respecto a las redes O/E/O puras, ya que el tráfico es tratado electrónicamente solo a los nodos de comienzo y fin de un *ligthpath*.

En general para algunos escenarios de modulación OCS se utilizan los siguientes pasos:

1. **Diseño de la topología virtual**, existen diferentes opciones para el diseño de estas topologías en De Miguel, Kozlovski & Bayvel (2002) y Durán (2008) se estudian en detalle diferentes alternativas para construcción de topologías virtuales y como son embebidas en topologías físicas (ver figura 1.32). Igualmente, en Dutta & Rouskas (2000) se cuenta con diferentes algoritmos para diseño de estas redes. En muchos procesos de diseño se emplea el algoritmo propuesto por Konda & Chow (2001), similar al de Banerjee, Yoo & Chen (1997), se ejecuta dicho algoritmo que toma una matriz de tráfico como parámetro de entrada y calcula (i) el número de caminos de luz establecidos entre cada para de nodos, (ii) luego como la demanda de tráfico es encaminado desde el top de los caminos de luz minimizando el número de *transceivers* usados.

2. **Encaminamiento del camino de luz (*lightpath*)**, los caminos de luz calculados en el paso previo son encaminados sobre las fibras resolviendo el problema del flujo *multicommodity* donde los caminos de luz son los *commodities* y la capacidad en los enlaces está dado por el número de longitudes de onda en las fibras de interconexión. La función objetivo se fija para minimizar el número promedio de saltos físicos de los caminos de luz.

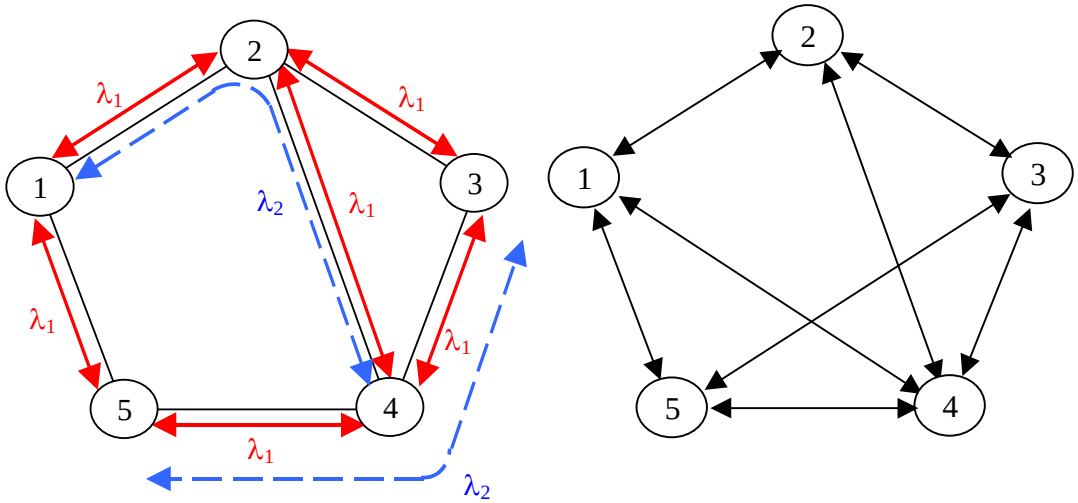


Figura 1.32. Topologías WRON física y lógica

3. **Asignación de longitudes de onda,** los caminos de luz son procesados secuencialmente y la longitud de onda es asignada a cada uno en un esquema *first-fit*. Los conversores de longitud de onda se emplean solo en el caso de no encontrar una longitud de onda en la ruta.

Si al llegar al paso 2 y no se encuentra un diseño adecuado para el conjunto de caminos de luz encontrados en el paso 1, si se llega al paso 3 entonces desde el punto de vista heurístico se busca minimizar el número de conversores a longitud de onda a emplear.

- **Algunos resultados**

Un análisis de los resultados para el *throughput* máximo de la red, como una medida del máximo valor que puede ser obtenido de una infraestructura de red. Para el caso de redes OBS se define el *throughput* como el máximo valor que puede tomar el parámetro TI, para lo cual todos los LSPs exhiben una probabilidad de pérdida de trafico menor de 10^4 (la probabilidad de perdida de bit se extrae de la probabilidad de perdida de ráfaga por el peso de las perdidas por la longitud de la ráfaga.

En general es posible observar como las redes OBS tienen un buen comportamiento al manejar el ancho de banda óptico que OCS, pero en valores de W altos.
Con respecto a la comparación de costos entre OBS y OCS se puede observar lo siguiente:

- **Equipo de conmutación óptica**: La complejidad del OSF (*Optical Switch Fabric*) es mayor en OBS ya que este se debe reconfigurar ráfaga a ráfaga. Este valor se puede incrementar si se emplean conversores de longitudes de onda.

- **Procesamiento electrónico**: en el caso de los nodos de borde (*edgeNodes*) se requiere de la realización de procesos en el dominio electrónico como lo es la clasificación de paquetes, ensamble y desensamble de ráfagas, la implementación y ejecución de algoritmos de planeación, mientras que en los nodos intermedios solo se requiere el procesamiento del BCP (o BHP) y no de las ráfagas. Al contrario, en los nodos de borde en una red OCS se debe tratar paquete por paquete lo que implica mayores requerimientos de procesamiento.

- Otro aspecto a tener en cuenta es el número de conversores O/E y E/O necesarios en los nodos de frontera tanto en canales de control (uno por fibra) lo cual también influye en el costo asociado a las redes.

Como resumen, existen muchos estudios que muestran a OBS como una mejor alternativa que OCS, pero no hay consenso respecto a la validez de los resultados obtenidos en las pruebas. Existen trabajos en los cuales la configuración de las redes OBS se asumen condiciones que llevan a dudar de la validez de esos resultados en redes reales, como en Agrawall, El-Bawab & Sofman (2005), Leenher *et al*. (2009) y en Zalesky (2009). En otros trabajos como el de Coutelen, Elbiaze & Jaumard (2005) los experimentos realizados producen probabilidad de pérdida de ráfagas del orden de 10^{-3} o mayores. O retardos altos en los nodos de entrada (Zalesky 2009). Finalmente, es de anotar que OBS ha llamado la atención de la comunidad debido a su potencial para reducir el número de conversiones O/E/O necesarios eliminando la necesidad de procesar paquete por paquete en cada salto.

Igualmente en (Pavon & Neri 2011) se concluye que OBS es más costoso que OCS en cuanto a que degrada el uso de la red en dos *overheads* inevitables, entre ellos el gap que existe entre ráfagas (ver sección sobre parámetros de una ráfaga) y la longitud de onda dedicada al canal de control. Además de las limitaciones que pueden presentarse cuando se trata de controlar la contención en los nodos en el dominio óptico. Estos autores consideran que OBS puede llegar a ser competitivo con OCS cuando solucione los problemas de resolución eficiente de la contención.

En lo relacionado con la longitud de las ráfagas (con longitudes de ráfaga del orden de 10ms) son necesarias para limitar el *gap* entre ráfagas. El incremento de retardos en el ensamblado y los retardos asociados a la solicitud de caminos RWA son compensados por la forma como se conmuta la ráfaga en los nodos y la manera como se mejoran las características del encabezamiento. Si de utilizar FDLs en la red se trata, los costos para retardar una ráfaga del orden de ms puede requerir de kilómetros de fibra (como ejemplo se menciona el hecho de que para una ráfaga de 10ms requiere de unos 2000km de fibra con 25 *spans*), este aspecto puede hacer inviable el empleo de OBS. Dentro de las alternativas para controlar la contención se propone el empleo de ranuras de tiempo con lo cual es aspecto asincrónico de la red se pierde (uso de ráfagas de tamaño fijo).

Por su parte en Waheed (2011) se hace una comparación entre OBS y OPS comenzando por destacar la importancia de realizar el encaminamiento por medio de longitudes de onda (WR) y el transporte de la información en el ámbito completamente óptico. Posteriormente hace un recuento de lo que significa OPS y cada una de sus particularidades entre ellas la dificulta de almacenamiento de los paquetes en el dominio óptico. Sobre OBS hace igualmente un resumen de sus características como el proceso de ensamble donde se reitera que se tiene en cuenta la dirección de destino y la clase de servicio.

En conjunto con se demuestra que los diferentes esquemas de ensamble (por tiempo y por longitud de la ráfaga) afectan el desempeño de la red y el trafico ensamblado. Es así como la variancia del tiempo entre arribo de las ráfagas que llegan desde diferentes nodos de entrada (borde) puede ser muy pequeña cuando se presenta alca carga de tráfico, esto puede causar colisiones no deseadas y genera un tiempo offset extra perdiendo sincronización. Un aspecto que se resalta sobre OBS es la posibilidad de ofrecer QoS mediante el uso de tiempos *offset* variables, lo que permite que ráfagas de alta prioridad puedan ser atendidas con menos pérdidas, aunque un *offset* largo puede adicionar un retardo adicional en el nodo de borde. El desempeño de este mecanismo de tiempos *offset* diferenciados depende de la longitud de la ráfaga y las distribuciones del tiempo entre arribos (Qiao & Yoo 1999).

Se han propuesto otros mecanismo de controlar la posible pérdida de ráfagas en el núcleo de la red OBS mediante la realización de una clasificación de los paquetes en el nodo de borde con base en la prioridad que se asigne a los paquete se están siendo ensamblados.

De otro lado otros estudios hacen alusión a la clasificación de los paquetes a ser ensamblados en paquetes *multicast* y *unicast* en ráfagas diferentes, lo cual implica que las ráfagas pueden llegar a distintos lugares que requieren la información (Jeong, Cankaya & Qiao 2002). Se observa igualmente en otros trabajos como al tratar de implementar IP/WDM con OBS el tiempo de ensamble tiene efectos sobre el *throughput* TCP, se tiene el caso de una fuente TCP con un ancho de banda limitado en el área de acceso y con un tiempo de ensamble corto puede hacer que solo un segmento TCP pueda ser transportado en una ráfaga, introduciendo un retardo adicional del proceso de ensamble.

Al comparar OBS y OPS se consideran los tiempos requeridos para almacenar la información empleando FDLs ya que un retardo de 1milisegundo puede requerir de 200 kilómetros de fibra. Es este un aspecto de hace que OBS tenga más aceptación que OPS aunque no se ha dicho la última palabra al respecto. VIcat-Blanc *et al.* (2011) se muestra una comparación entre OCS, OBS y OPS mostrando propiedades claves de estos tres paradigmas (ver tabla 1.10). A modo de resumen final, se muestra en la Tabla 1.11 una comparativa entre las principales alternativas de redes de comunicaciones ópticas mencionadas anteriormente, OCS, OBS y OPS, en cuanto a los requisitos tecnológicos y rendimiento obtenido por cada una de ellas.

	OCS	**OBS**	**OPS**
Tamaño de datos de transferencia	> Gbps	Docenas de kB	Tamaño de paquetes IP
Garantía de Ancho de banda	Si	No	No
Posibilidad de Bloqueo	En el proceso de establecimiento	En cada conmutador	En cada conmutador

Tabla 1.10. Breve comparación entre los paradigmas OCS, OBS y OPS

	OCS	OBS	OPS
Velocidad de conmutación necesaria	ms	µs-ms	ns-µs
Señalización	Fuera de banda	Fuera de banda/en banda	En banda
Complejidad del hardware	Muy baja	Media	Alta
Problemas y algoritmos de control	*Routing and Wavelength Assignment* (RWA) estático y dinámico	Algoritmos de ensamblado. Planificación de ráfagas Resolución de contienda	Resolución de contienda. *Schedulers* de paquetes de alta velocidad
Complejidad de los algoritmos de control	Media	Muy alta	Alta
Complejidad del encaminamiento	Media/alta	Alta para mejorar rendimiento	Alta
Utilización del ancho de banda	Baja	Alta (multiplexación estadística de ráfagas)	Alta (multiplexación estadística de paquetes)
Eficiencia	Baja	Alta	Alta
Throughput	Alto	Pérdidas de ráfagas pueden bajar el *throughput*	Alto
Retardo	Bajo	Retardo extra por la generación de ráfaga	Retardo extra por encolado de paquetes

Tabla 1.11. Comparación entre OCS, OBS y OPS (González 2012)

Hasta el momento se ha hecho una descripción de las redes ópticas en especial OPS y OBS, sobre esta última se han tratado de incluir elementos que muestran las diferentes alternativas abordadas en la investigación alrededor del mundo para brindar aportes significativos sobre OBS e impulsar esta alternativa como elemento esencial en el soporte para la Internet óptica.

Sin embargo, aún no se tiene la última palabra sobre la operación de estas redes. Se pueden trazar aristas hacia el futuro y vislumbrar, como será la arquitectura, la operación y la funcionalidad de las redes OBS. Uno de los retos consiste en la posibilidad del empleo de métodos cognitivos que puedan ser implementados en los diferentes componentes que forman parte de las arquitecturas física y funcional de estas redes.

Esta Tesis busca realizar un aporte en este aspecto, se proponen modelos de redes OBS que incluyen algunas meta heurísticas (Talbi 2009; Kennedy & Eberhart 1995), los cuales pueden ser enriquecidos con elementos cognitivos para intentar mejorar su desempeño (Dutta, Roy & Choudhury 2013). De esta forma se puede imaginar las redes OBS en el futuro como estructuras que toman decisiones y aplican el ciclo cognitivo[20] en su operación (Mahmoud 2007), se trata de construir un plano de conocimiento como se plantea en Clark *et al.* (2003) enriquecido con otros elementos que permitan concebir una arquitectura cognitiva aplicable a las redes OBS.

1.4.6. Retos en investigación

Los avances en las redes OBS representan diferentes retos en investigación que están siendo abordados en la academia principalmente en el desarrollo de tesis de master y de doctorado en el área y sus productos (*papers*, artículos, patentes, libros, etc.), de las cuales se puede evidenciar la existencia de tópicos que aún están por abordar. Esta sesión busca mostrar algunos retos presentes en los diferentes procesos de investigación que se están desarrollado y otros que se pueden afrontar en futuros trabajos (Fernández, Megala & Sreenath 2013).

- En cuanto al desempeño de las redes OBS en particular, se sigue trabajando en la búsqueda de soluciones que permitan disminuir el retardo extremo a extremo

[20] Relación entre aprendizaje, desempeño , conocimiento y entorno (Dietterich & Langley 2003)

que experimentan las ráfagas, aunque es un tópico que ha sido abordado desde diferentes perspectivas, aún quedan por explorar modelos de algoritmos para ensamble y transmisión de ráfagas que puedan incluir elementos cognitivos para mejorar el desempeño de la red. Igualmente, el desarrollo de modelos matemáticos que permitan optimizar funciones dentro de los nodos de borde o frontera.

- Al igual que la disminución de retardos se busca disminuir la probabilidad de pérdida de ráfagas mediante la propuesta de algoritmos que optimicen los procesos de operación de la red OBS y que inciden directamente en este parámetro.

- Desde el momento en el cual los paquetes de datos (principalmente paquetes IP) ingresan a los nodos de borde, siguiendo su proceso de ensamble en ráfagas, la planificación y envío de las mismas, el encaminamiento, la conmutación y hasta que llegan al nodo de borde de egreso, se presentan circunstancias que deben ser resueltas favorablemente para evitar que las ráfagas sean descartadas, con la correspondiente disminución del desempeño de la red. Se presenta entonces una gran variedad de espacios de investigación que pueden ser abordados desde diferentes enfoques.

- Modelos de señalización, tomando como punto de partida estudios en (Marchetto 2010) y (Baldine *et al.* 2002) entre otros, se pueden realizar propuestas que incluyan elementos predictivos para obtener modelos de señalización que permitan mejorar el desempeño general de la red OBS. Como se ha referenciado anteriormente, la búsqueda de mecanismos variantes en la señalización así como la propuesta de nuevos mecanismos, hacen de esta temática sea de constante investigación en el campo de las redes OBS.

- Seguridad en redes OBS, desde las propuestas iniciales hechas en (Chen & Verma 2008), donde se define algunos modelos de seguridad en OBS, quedando por definir modelos de autenticación, confidencialidad y cifrado de la información (tanto BCP como la ráfaga de datos), igualmente se pueden desarrollar propuestas que incluyan modelos recientes de seguridad aplicables a OBS.

- Control de congestión y contención, numerosas propuestas se han realizado para control de contención en redes OBS *slotted* (Coulibaly *et al.* 2011) y posibles algoritmos para control de congestión especialmente en los nodos intermedios de las redes OBS, otro autores proponen un modelos con etiquetas como MPLS para control de contención, esta propuesta y otras similares permiten proponer nuevos laboratorios de prueba (*test-beds*) para estas tecnologías con posibles desarrollos en hardware, igualmente en (Magana *et al.* 2005) se muestra el posible impacto sobre la QoS de las redes OBS al emplear mecanismos de *preemption*.

- Nuevos modelos de red, en Peng *et al.* (2009) se propone un modelo de red OBS generalizado, esta propuesta puede ser evaluada, generar modelos matemáticos para comprobar su desempeño y realizar simulaciones para diferentes clases de servicios a soportar. Igualmente, en (Ramamirtham & Turner 2003) se proponen modelos para que la red opere en el dominio del tiempo y no en el dominio óptico, lo cual puede dar origen a nuevas propuestas sobre la búsqueda de mecanismos para mejorar el desempeño de la red al momento de soportar tráfico en ráfagas como el IP.

1.5. Conclusiones del Capítulo

Aunque en secciones anteriores se ha hecho alusión a posibles conclusiones sobre las temáticas abordadas en este capítulo (especialmente sobre OBS), es esencial para el cierre del mismo realizar un compendio de las conclusiones de mayor relevancia sobre los aportes que se hacen para el cumplimiento del primer objetivo de esta Tesis.

- En la elaboración del Capítulo se han consultado diferentes fuentes siempre con el ánimo de lograr consolidar los conceptos que finalmente se han incluido en el documento, asimismo se ha tenido presente la intención de construir una base conceptual sólida, como se expresa en uno de los objetivos planteados. Quedan muchas fuentes por consultar y muchos elementos que pueden formar parte del mismo, sin embargo se espera que con los siguientes capítulos se complementen los aspectos que puedan haber quedado pendientes.

- OBS se perfila como la tecnología que más promete en cuanto a la solución como infraestructura de comunicaciones con enfoque hacia Internet óptico. Se trata de una propuesta que conjuga lo mejor de la conmutación óptica de circuitos y la conmutación óptica de paquetes. Mientras OCS se caracteriza por la velocidad en el establecimiento de los circuitos ópticos, la retención de los recursos durante toda una sesión y la poca granularidad, OPS presenta alta granularidad pero debe conmutar cada paquete para lo cual requiere un alto nivel de procesamiento de encabezamientos lo que puede originar sobrecarga de los nodos en la red. OBS aunque ha tenido detractores, permite una transición suave para el tráfico IP, además de manejar los recursos solo durante el tiempo que dura el transporte de la ráfaga, posteriormente la longitud de onda que había sido empleada se libera. Al contrario de OPS en OBS no se requiere de almacenamientos de información en los nodos intermedios (siendo *bufferless*), al compararla con OCS no se requiere de conversiones O/E/O para la ráfaga de datos.

- En el presente capítulo se ha buscado incluir información relevante en cada componente de las redes OCS, OPS y OBS. De las diferentes tecnologías OPS ha tenido serios inconvenientes a nivel de almacenamiento intermedio sobre todo para cumplir con el comportamiento de almacenamiento y reenvío propio de las redes por conmutación de paquetes debido principalmente a la carencia hasta el momento de memorias RAM ópticas.

- Uno de los aspecto al que se ha dedicado un estudio especial es al problema RWA, esto se debe a la importancia que tiene este ítem dentro del desarrollo de la Tesis ya que uno de los métodos de control cognitivos desarrollados se enfoca a resolverlo mediante el uso de meta heurísticas.

- Sobre estas tecnologías ópticas en especial OCS se ha hecho un extenso proceso de investigación en diferentes centros universitarios, empresas de telecomunicaciones, laboratorios e iniciativas particulares alrededor del mundo, lo cual brinda un abanico muy extenso de propuestas, variantes, modelos, algoritmos y mecanismos, todo con el ánimo de consolidar cada tecnología y participar en la búsqueda constante de una solución a un problema evidente como es el crecimiento de Internet y su exponencial demanda de recursos en las redes tipo *core*. Finalmente, cabe anotar que un aspecto muy interesante es el

hecho que aunque muchas preguntas sobre OBS y OPS se han resuelto, cada día surgen nuevas inquietudes que hacen de las comunicaciones ópticas un campo de gran actividad investigativa en la actualidad. Es decir sigue siendo un tema abierto en investigación.

Capítulo 2

Redes OBS

2.1. Introducción

En el capítulo anterior se realizó una descripción sobre los principales aspectos que hacen parte del paradigma OBS (*Optical Burst Switching*) en relación con los componentes físicos (nodos de borde, de núcleo y enlaces WDM o DWDM), las funciones desempeñadas por cada componente, la separación entre canales de control y de datos, la definición del tiempo *offset* entre el BCP y la ráfaga de datos, los algoritmos de ensamble de ráfagas, el procesamiento de las ráfagas en aspectos como reserva y liberación de recursos, protocolos de reserva de longitud de onda (por ejemplo JIT, JET y Horizon), mecanismos de control de contención, entre otros. Se ha hecho igualmente una descripción de los aspectos positivos y desventajas que pueda tener OBS respecto a sus competidores OCS y OPS, en este proceso de comparación es importante destacar que el empleo de redes ópticas basadas en OBS permite enviar los datos (ráfagas de datos) en el dominio completamente óptico y que el número de encabezamientos necesarios se disminuye (un encabezamiento por cada ráfaga), lo anterior implica un mejor aprovechamiento del ancho de banda disponible, menores retardos en la transmisión y un procesamiento más eficiente del ancho de banda disponible.

Se destaca igualmente la inclusión de algunos escenarios de prueba de diferentes iniciativas en investigación alrededor de OCS y OBS donde se mide el desempeño

de la red principalmente mediante la medida de la Probabilidad de Perdida de Información (ráfagas) o BLP (*Burst Loss Probability*) y la disminución de retardos de transmisión salto a salto y extremo a extremo. Tanto la BLP como el retardo extremo a extremo que experimentan las ráfagas son las principales medidas que se realizan para comparar el desempeño de las redes OBS cuando se realizan propuestas novedosas respecto a los algoritmos tradicionales.

Con las bases conceptuales descritas, se procede a realizar un estudio con mayor detalle enfocado en aspectos de funcionalidad de las redes OBS. Siendo OBS el marco de referencia para el desarrollo de esta Tesis, el presente capítulo busca incorporar otros elementos indispensables para el diseño de las propuestas que se construyen en detalle en los capítulos 3 y 4. Para su estudio, el contenido se subdivide en dos partes: la primera se dedica a desarrollar y analizar con mayor profundidad cada uno de los aspectos que forman parte de la tecnología OBS haciendo especial énfasis en la arquitectura del nodo de frontera o de borde (*edgeNode*) y cada una de sus funciones actuando como nodo de ingreso y egreso respectivamente, se toma cada componente y se realiza una descripción funcional desde que el tráfico que se produce en las afueras de la red OBS (clientes IP preferiblemente) ingresa a los nodos de borde, se clasifica, se ensambla, se planifica, se convierte al dominio óptico, se envía, se encamina a través de la red y finalmente alcanza el nodo de egreso donde se desensambla y el tráfico es entregado a los clientes de destino en el formato o unidad de datos de protocolo PDU (*Protocol Data Unit*) como fue recibido inicialmente.

Como el componente esencial de las redes OBS es la ráfaga, en la segunda parte del capítulo se hará un tratamiento aparte de esta unidad de datos, su conformación, su estructura y el impacto que tiene en el desempeño de la red. Asimismo se describen los algoritmos que permiten el ensamble y desensamble de las mismas, la incidencia del tipo de tráfico que se ensambla, elementos de calidad de servicio QoS involucrados, mecanismos de planificación empleados, enrutamiento y asignación de longitudes de onda y protocolos de señalización.

Se comienza entonces con la descripción sobre el origen de la conmutación de ráfagas, el que y por qué OBS, los tipos de tráfico que se transporta, las variables involucradas en el proceso de ensamble de ráfagas, para esto se ha consultado una

variedad de referencias bibliográficas que incluyen el génesis de la tecnología como es el caso de los escritos de Qiao & Yoo (1999), las patentes registradas por diferentes autores, los libros especializados en OBS, entre otros. Al final se hace una semblanza de las variantes de OBS en especial LOBS y WROBS.

2.2. Por qué OBS y qué es OBS?

Para colocar la temática de Conmutación Óptica de Ráfagas en contexto, se comienza describiendo el concepto de Control Polimórfico (Qiao & Yoo 1999) del cual OBS forma parte. La infraestructura para el denominado Control polimórfico es el producto de integrar ideas de investigación y resultados del desarrollo de arquitecturas de red ópticas, modelos de control y gestión de redes. Con estos elementos se proponen distintas formas de transportar información a través de redes con infraestructura óptica, surgen propuestas como OCS, OPS y OBS como se describe en el Capítulo 1. En seguida se hace un acercamiento conceptual sobre el Por qué surge OBS y cuál puede ser su incidencia como infraestructura de soporte para Internet óptico.

En las redes ópticas se puede adoptar el sistema de reconfiguración por demanda en las cuales las medidas de desempeño incluyen *throughput*, utilización, retardo y probabilidad de bloqueo, en este caso los patrones de tráfico cambian dinámicamente y son soportados por la transferencia de información de dos formas: conmutación de circuitos y conmutación de paquetes. Con la conmutación de circuitos las conexiones o *lightpaths* entre fuente y destino se establecen antes de enviar los datos y se liberan una vez termina la transferencia. Para esta clase de conmutación, los procesos de control tanto centralizado como distribuido han sido estudiados con detalle en muchos trabajos previos. En general para la señalización se propone un esquema fuera de banda (*out of band*) mediante el empleo de una longitud de onda dedicada (Jue & Vokkarane 2005).

En el caso de la conmutación de paquetes OPS, al realizar una comparación con OBS y complementando lo anotado en el anterior capítulo, cada nodo intermedio almacena un paquete entrante y lo reenvía hacia el próximo nodo de acuerdo con la información del encabezamiento y la información almacenada localmente en la tabla de encaminamiento. En general se emplea el control distribuido y la señalización en

banda (*in band*). En este caso se aprecia que los flujos de paquetes son conmutados con base en la información que llevan en el encabezamiento de cada paquete y la información local de cada nodo. Esta información puede ser configurada previamente por paquetes que pertenezcan al mismo flujo (ejemplo: conmutación IP o conmutación de etiquetas o *Tags*).

La principal motivación para considerar OBS como red soporte a Internet óptica es en principio la presencia de una gran variedad de tráfico de servicios multimedia en banda ancha el cual se presenta principalmente en ráfagas. Existen diferentes estudios que demuestran que además del tráfico Ethernet en las redes locales y entre redes Ethernet remotas a través de una WAN, el tráfico generado por la Web, las conexiones **FTP** (*File Transfer Protocol*) y **TELNET** (acceso remoto) sobre **TCP** (*Transport Control Protocol*), y el tráfico de video con velocidad de bit variable **VBR** (*Variable Bit Rate*) todos corresponden a tráfico auto-similar (***self-similar*** o en ráfagas en todas las escalas) algunos de estos estudios comenzaron con Leland *et al*. (1994), posteriormente Erramilli, Narayan & Willinger (1996) y Paxon & Floyd (1995) concluyeron que contrario al comportamiento de tráfico asumido como Poisson, al multiplexar un gran número de flujos de tráfico *self similar*, el resultado es tráfico en ráfagas.

En la actualidad, existen paradigmas de conmutación en redes ópticas que no soportan tráfico en ráfagas, específicamente, al usar la conmutación de circuitos vía enrutamiento por longitudes de onda, un *lightpath* necesita ser establecido entre un nodo fuente y un nodo destino usando una longitud de onda dedicada sobre cada enlace a lo largo de un trayecto físico. Igualmente, el ancho de banda no tiene un uso eficiente cuando la transmisión de datos no es de larga duración comparada con el tiempo empleado en el establecimiento del *lightpath*. Además, dado que el número de longitudes de onda disponibles es limitado, un nodo no tiene un *lightpath* dedicado hacia cada nodo en la red, igualmente, algunos datos toman rutas largas a través de múltiples conversiones O/E y E/O. Asimismo, como los *lightpaths* tienen un alto grado de transparencia en la red se limitan las capacidades de gestión de la red por ejemplo en casos de realizar monitoreo y recuperación rápida desde la ocurrencia de fallas.

Como alternativa a la Conmutación Óptica de Circuitos OCS ser propone la conmutación óptica (o fotónica) de paquetes (y celdas) OPS (*Optical Packet Switching*) en la cual como se ha mencionado anteriormente, un paquete es enviado con su correspondiente encabezamiento (Blumenthal, Feuerstein & Sauer 1994), (Chlamtac *et al*. 1996) y (Cruz & Tsai 1996), en este caso mientras el encabezamiento es procesado electrónicamente (luego de una conversión O/E), el paquete es almacenado en el nodo en el dominio óptico. Aunque como es conocido no existe aún la tecnología óptica de alta velocidad la implementación de memorias ópticas y para los procesos de sincronización necesarios. Lo cual sigue limitando el desarrollo de esta tecnología, aunque la investigación al respecto continúa.

Entonces, para brindar servicios de transporte con alto ancho de banda en el nivel óptico para el tráfico presente en forma de ráfagas de una forma flexible, eficiente, confiable que además permita un mejor aprovechamiento de las propiedades de los sistemas de comunicaciones ópticas y al mismo tiempo tenga en cuenta sus limitaciones, se propone la técnica OBS (Qiao & Yoo 1999).

Se recuerda que en OBS un paquete de control BHP (*Burst Header Packet*) es enviado inicialmente para establecer la conexión (con el objetivo de reservar una cantidad apropiada de ancho de banda y configurar los conmutadores a lo largo del trayecto), luego se envía una ráfaga de datos sin esperar un reconocimiento desde el destino para el establecimiento de la conexión. Es decir OBS emplea principalmente el protocolo de reserva en una vía (*one way reservation*) similar a protocolo TAG (*Tell And Go*) propuestos en (Qiao & Yoo 1999), tomado del protocolo de reserva rápida o FRP (*Fast Reservation Protocol*) del modo de transferencia asincrónico ATM (*Asynchronous Transfer Mode*). Asimismo, se diferencia de OCS en que esta técnica emplea señalización en dos vías TAW (*two way reservation protocols*) y de otras técnicas de conmutación de ráfagas que emplean protocolos de reserva/planeación con algoritmos tipo JIT (*Just In Time*), IBT y RFD.

RFD (*Reserve a Fixed Duration*), a diferencia de los dos protocolos anteriores, sólo ha sido estudiado para redes ópticas. Al igual que TAG, este protocolo envía inicialmente un paquete de control que lleva información del ancho de banda necesario para la transmisión de la ráfaga y, adicionalmente, contiene el tiempo de

duración de la misma, así que permite la reserva del ancho de banda por un periodo determinado.

Los dos protocolos que han tenido mayor acogida por la comunidad de investigadores para la señalización en redes OBS son JIT (*Just In Time*) basado en TAG y JET (*Just Enough Time*) basado en RFD. Se recuerda que cuando se está trabajando con el protocolo JIT, un nodo OBS configura los conmutadores ópticos para la ráfaga; tan pronto como es recibido y procesado el paquete de control correspondiente, los recursos del nodo se ponen a disposición antes de la llegada de la ráfaga sin tener en cuenta tiempos *offset*, lo que permite la simplicidad del sistema de señalización, pero también el uso ineficiente de los recursos de la red.

JET basado en RFD, es el protocolo más utilizado en redes OBS, esto es debido a que muestra una mejor utilización del ancho de banda al realizar la reserva de recursos únicamente desde la llegada de la ráfaga hasta que es conmutada y no desde la llegada del paquete de control al nodo. Este protocolo es el escogido para implementar las redes OBS/WDM basadas en meta heurísticas con y sin métodos de control cognitivo

La idea central de OBS es conmutar desde uno hasta varios paquetes o datagramas IP en una sola sesión empleando únicamente un paquete de control de ráfaga. De esta forma se logra aumentar la eficiencia de la comunicación al reducir el número de encabezamientos necesarios y se elimina la necesidad de conmutar un número grande de encabezamientos lo que permite optimizar el proceso de conmutación en los nodos centrales. Igualmente, al emplear señalización fuera de banda es posible separar el paquete de control de la ráfaga de datos, esto se logra mediante la inclusión de un tiempo denominado *offset* el cual debe ser lo suficientemente largo tanto o más que el tiempo de procesamiento del paquete de control a través del trayecto que debe seguir la ráfaga (Jue & Vokkarane 2005), con esto se asegura que al momento de enviar la ráfaga esta no requiera de almacenamiento intermedio (y no requiera abandonar el dominio óptico). Algunas variantes de OBS proponen realizar el proceso de envío de la ráfaga mediante la definición de un tiempo de retardo fijo por nodo y empleando el protocolo TAG (*Tell And Go*) aunque esta propuesta no se considera en el desarrollo de la Tesis.

Otra forma de transportar datagramas o paquetes IP sobre enlaces WDM usando OBS consiste en ejecutar un software IP más un software de control como parte de la interfaz entre el nivel red y el nivel WDM, el cual se encuentra en la cúspide de cada conmutador óptico WDM. En el nivel WDM, una longitud de onda de control dedicada se usa para proveer el enlace “estático/físico” entre las entidades IP. Puntualmente se emplea para soportar conmutación de paquetes entre entidades IP adyacentes las cuales mantienen la topología y tablas de enrutamiento.

Para el envío de datos un paquete de control se encamina desde una fuente a su destino basado en su dirección IP (o su etiqueta MPLS) y de esta forma configura todos los conmutadores ópticos a lo largo del trayecto. Posteriormente, se libera una ráfaga hacia el destino sin pasar por entes IP intermedios, reduciendo la latencia que implica el procesado de la información a nivel IP. Igualmente, dadas las características del paquete de control BHP, las redes OBS tienen un alto grado de adaptabilidad a congestión o fallas con lo cual el transporte de la información IP se debería poder realizar con mayor confiabilidad y disminuyendo las posibles pérdidas de ráfagas de datos ocasionadas por desperfectos en la red OBS.

Al contrario de lo que sucede en otras técnicas de conmutación óptica, en OBS las longitudes de onda que han sido utilizadas en un enlace son liberadas para ser empleadas por otra comunicación, esto puede suceder automáticamente acorde con la reservación realizadas (mediante JET por ejemplo) o mediante el envío de un paquete de liberación explícito. Igualmente, en el caso que el paquete de control falle al reservar el ancho de banda en un nodo intermedio, la ráfaga asociada a dicho BHP se pierde.

En este orden de ideas al requerirse la retransmisión de una ráfaga, se envía un paquete con un mensaje NAK o NACK (*Negative* ACK) hacia el nodo fuente, lo cual debe permitir volver a enviar un nuevo paquete de control y posteriormente la ráfaga de datos, esto se realiza cuando se transmite información directamente desde protocolos de aplicación y no en el caso del protocolo TCP que requiere de muy pocas retransmisiones. En cualquier caso, una ráfaga perdida desperdicia ancho de banda (especialmente en sistemas de reserva en doble vía). Es por esto que mientras se cuenta con las condiciones para enviar la ráfaga, ésta se almacena en *buffers* electrónicos en los nodos de borde.

En otras opciones de implementación, los nodos intermedios pueden utilizar líneas de retardo con fibras ópticas o FDLs (*Fiber Delay Lines*), esta clase de líneas no se exigen cuando se emplea el protocolo JET. Cuando se emplean protocolos OBS con base en TAG se requiere de FDLs para retardar la ráfaga mientras el paquete de control es procesado aunque en general no se logra mejorar el desempeño de la red.

Revisados algunos elementos sobre aspectos funcionales de OBS se procede a describir los aspectos más relevantes tomados como base para su construcción como una de las técnicas de conmutación óptica con mejores perspectivas en la actualidad.

2.3. Fundamentos de la Conmutación de ráfagas

2.3.1. Generalidades

OBS es un paradigma relativamente reciente en la conmutación óptica de información y se perfila como el soporte ideal para la próxima generación de Internet de una forma flexible tomando además características esenciales de la conmutación óptica de circuitos OCS y la conmutación óptica de paquetes OPS (Jue & Vokkarane 2005).

Existe un gran número de trabajos de investigación (analíticos y de simulación) y publicaciones al respecto que muestran diferentes variantes de OBS (OBS con control distribuido, WROBS o redes con control centralizado y LOBS basado en etiquetas, entre otros) en estas investigaciones se analiza principalmente el desempeño de la red OBS, considerando distintos escenarios algunos de los cuales se describen en el presente documento.

Se puede observar que entre las diferentes variantes de OBS se presentan dos características muy comunes que son asumidas al momento de realizar alguna clase de desarrollo sobre estas redes, estas características son:

- Los datos del cliente (por ejemplo paquetes IP, celdas ATM, enlaces SDH/SONET, Gigabit Ethernet, entre otros) viajan a través de la red OBS mediante procesos de ensamble y desensamble de ráfagas que ocurren

únicamente en los nodos de borde (de ingreso y de egreso) de una red OBS en el dominio electrónico principalmente, sin embargo, el aspecto relacionado con la multiplexación estadística a nivel de ráfaga puede permanecer en el núcleo de la red OBS.

- Las señales de control y de datos se transmiten separadamente sobre diferentes canales o longitudes de onda (canales de control y canales de datos respectivamente), de esta forma, la conversión O/E/O que se realiza en los nodos centrales es sobre algunos canales (canales de control) y no sobre múltiples canales de datos. Entonces, la ráfaga de datos una vez convertida al dominio óptico, no deja este dominio hasta que llega al nodo de destino. Para el caso de las redes con control centralizado, cada vez que se requiere enviar una ráfaga, es necesario enviar una solicitud (*Request*) a un nodo central (o servidor) que de acuerdo con determinadas políticas resuelve la solicitud y devuelve un asentimiento o una negación, en caso positivo envía en conjunto con el ACK (*Positive* ACK) los datos de los recursos reservados para dicha solicitud.

Como se observa en la figura 2.1, y acorde con lo mencionado, los procesos de ensamble y desensamble de ráfagas de paquetes (principalmente IP) se llevan a cabo en los nodos borde (ingreso y egreso) en el dominio electrónico para lo cual se crean almacenes de datos implementados mediante colas ubicadas en la memoria de acceso aleatorio RAM por medio de las cuales se pueden conformar o ensamblar las ráfagas de acuerdo con diferentes paradigmas o algoritmos de ensamble definidos previamente o seleccionados dinámicamente. Una vez creada la ráfaga y definida su ruta se convierte al dominio óptico y se envía un tiempo *offset* después de enviado el BHP[21] (o BCP), según el mecanismo de planificación empleado, asimismo, para el caso de WROBS las ráfagas se convierten al dominio óptico y se envían al destino una vez han recibido el ACK desde el nodo o servidor central.

Con estos elementos en consideración, se presenta una definición clásica de OBS la cual involucra las siguientes características:

[21] También se lo conoce como Paquete de Control CP (*Control Packet*), Mensaje de control, Mensaje de control de ráfaga, mensaje de configuración SM (*Setup Message*), entre otros. En el desarrollo del documento se le llamará indistintamente BCP o BHP.

- Separación temporal y espacial entre el encabezamiento BHP o BCP y la carga útil (*payload*) o ráfaga de datos (ver figura 2.2). El BHP se transmite en un canal de control separado dentro de la misma fibra y puede emplear memorias en el dominio electrónico en caso de contención. Este aspecto se denomina señalización fuera de banda. Por convención, si una red tiene N canales WDM (o DWDM), N-1 canales se usan para datos y uno para señalización o canal de control.

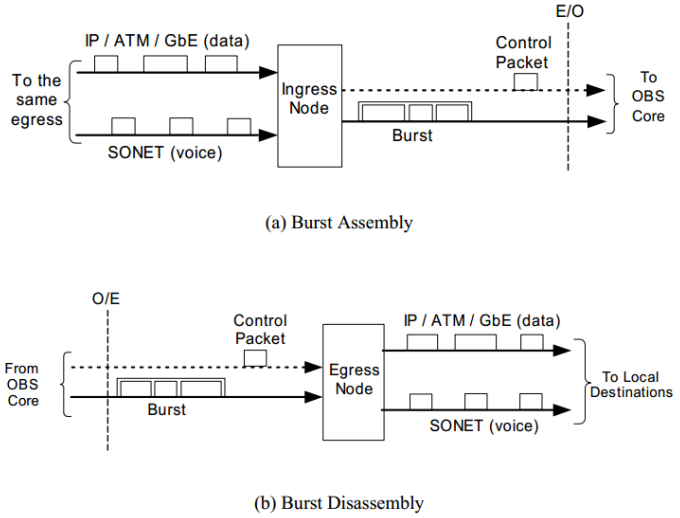


Figura 2.1. Procesos de ensamble y desensamble de ráfagas en los nodos de borde en una red OBS (Chen, Qiao & Yu 2004)

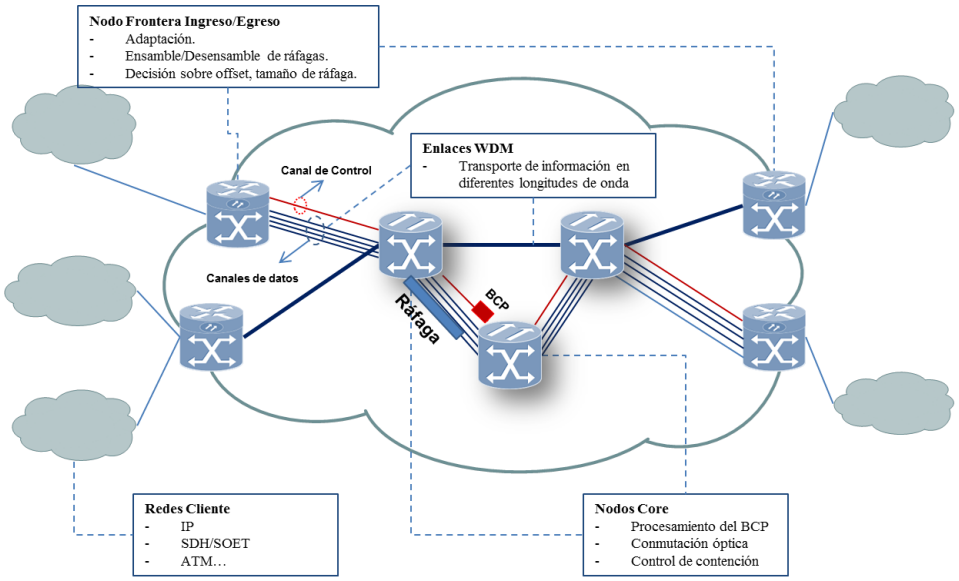


Figura 2.2. Red OBS destacando canales de control transportando BCP y canales de datos transportando ráfagas

- Es importante tener en cuenta que los canales de control se emplean para transportar diferentes BHP lo que puede ocasionar congestión en los nodos centrales de la red OBS en el dominio electrónico al momento de tratar con diferentes BHP. Se debe evitar que se pierdan BHP debido a saturación de registros o cuando se producen retardos altos lo cual obligaría a la pérdida de la totalidad de la información enviada en la ráfaga de datos.

- Tal como se ha expresado, OBS no emplea almacenamiento (*buffering*) óptico, solo es necesario definir algunos retardos para compensar el tiempo de procesamiento electrónico del BHP en los nodos intermedios. Una vez que el BHP ha configurado el *lightpath* la ráfaga de datos se envía sin salir del dominio óptico, por lo tanto no requiere de almacenamiento intermedio. Aunque este aspecto puede depender del modelo de señalización empleado si es JIT o JET, y cuando el modelo de control no es centralizado (*Request/Response*).

- La anticipación del encabezamiento, significa contar con un tiempo *offset* entre el BHP y el envío de la ráfaga de datos, lo que permite tener el tiempo suficiente para configurar la ruta y los conmutadores en los nodos intermedios. Este retardo artificial (*offset*) es introducido en los nodos extremos de la red. La elección del *offset* ha sido objeto de muchos procesos de estudio e investigación, este parámetro debe ser lo suficientemente grande para asegurar que la ráfaga no se perderá, y que por lo tanto el BHP alcanzó a configurar exitosamente el *lightpath*. Asimismo, este aspecto influye en el aseguramiento de la QoS a los paquetes que son ensamblados en ráfagas que se diferencian por prioridades ya que con un valor adecuado del *offset* se asegura que los datos pueden ser entregados exitosamente, pero se debe tener cuidado con los retardos que puedan experimentar los paquetes ya que además del tiempo *offset* tendrían que esperar hasta que la ráfaga se ensamble, lo que puede ser intolerable en algunas aplicaciones en tiempo real con altas exigencias en cuanto a retardos.

- Para el procesamiento del BHP el planificador (o *scheduler*) del nodo respectivo emplea la información de direccionamiento, tiempo *offset* y la longitud de la ráfaga para de esta forma localizar y asignar el canal de salida de la ráfaga. Este proceso se describe en detalle más adelante dentro de este mismo capítulo.

- OBS realizar la reserva de recursos para la ráfaga solo el tiempo durante el tiempo de utilización de la misma, una vez los recursos han sido utilizados, estos se liberan para que puedan ser empleados por otra conexión, el proceso de liberación depende de los métodos de señalización empleados, algunas veces se realizar mediante el envío de un mensaje tipo *Release* o después de cierto tiempo.

- Al realizar la reserva de recursos en una vía (*one way*) y en el caso de no haber recursos disponibles tanto el encabezamiento como la ráfaga de datos son descartados. Esto sucede al presentarse contención en los nodos debido a que no existe una forma de controlar el uso de los recursos en la red por lo general pueden establecerse mecanismos de control de contención (deflexiones de ruta, uso de fibras de retardo FDL, quitar recursos o *preemption* en varios niveles, entre otros).

- OBS se vale del proceso de ensamblaje de tráfico en ráfagas en la medida que éste llega a un nodo borde de ingreso, así a las ráfagas se las considera como paquetes de gran longitud y tamaño variable. Más adelante en este capítulo se describen las particularidades de las ráfagas empleadas en redes OBS y su modo de ensamblaje.

- Operación asíncrona, como se anota en el ítem anterior, la ráfaga es de tamaño variable y no necesita estar sincronizada en la entrada de cada conmutador que compone la red, en caso de desfases entre el BHP o BCP y la ráfaga de datos, se puede emplear un *buffer* intermedio en los nodos del núcleo de la red que sirva como elemento de conformado de tráfico, esta es una forma de controlar el jitter cuando se presenta.

- OBS no requiere de conversiones O/E/O para los datos de usuario (ahorro de costo en equipo y consumo de potencia). Lo anterior contribuye también a reducir el retardo extremo a extremo experimentado por las ráfagas de datos.

- La velocidad del número de encabezamientos por segundo que pueden ser procesados por un nodo OBS depende del tamaño promedio de la ráfaga. Pero su velocidad no está acoplada con la del plano de datos.

Resumiendo, OBS es una opción dentro de la conmutación óptica de información que presenta ventajas respecto a otras tecnologías propuestas y que para su operación requiere de procesos funcionales principalmente dentro de los nodos de borde, sin embargo, son los nodos centrales los responsables del transporte sin error de las ráfagas ópticas. Finalmente, OBS en el contexto de las redes WAN regionales tendrá que ser capaz de transmitir datos más allá de 200 km y soportar un tráfico dinámico. A corto plazo, OBS puede emplearse en redes en anillo, por lo que la conmutación en los nodos se simplifica. A medio/largo plazo, tendrá que migrar hacia redes malladas para ofrecer una mayor cobertura y supervivencia ante posibles fallos.

2.3.2. Características de las Ráfagas

Debido a que uno de los aspectos considerados en el desarrollo de la Tesis se orienta al análisis del proceso de la generación de las ráfagas en el dominio electrónico (en el nodo de borde actuando como nodo de ingreso), es necesario dedicar una parte de este capítulo al estudio de los diferentes elementos que conforman las ráfagas, se comienza con una definición general y posteriormente se describen los diferentes componentes de la misma.

Desde su uso en redes electrónicas, una ráfaga se define como un grupo o conjunto de paquetes consecutivos con espacios cortos entre dichos paquetes (*gaps*) y un tiempo entre arribo de paquetes (*interArrivalTime*), estos paquetes pueden provenir de un mismo flujo o de flujos diferentes. El tiempo entre el arribo de paquetes se cuenta desde el ultimo bit del paquete *i* hasta el primer bit del paquete $i + 1$.
Considerando la figura 2.3, una ráfaga se puede denotar como una función $\boldsymbol{B} = f(t, d_i)$, donde el tiempo t está entre ($t_d - d_1$, $t_d + d_2$) siendo d_i la tolerancia y t_d el tiempo de arribo entre paquetes predefinidos. Así, los paquetes consecutivos que forman una ráfaga son los considerados dentro del intervalo de tiempo t_a que esta en $\{td - d1, td + d2\}$ donde d_i está entre {0.0 y t_d} y d_1 no puede ser igual a d_2.

Dentro de la conformación de la ráfaga se cuentan una serie de parámetros que en principio son empleados para el análisis del proceso de ensamblado en general y no necesariamente en redes OBS.

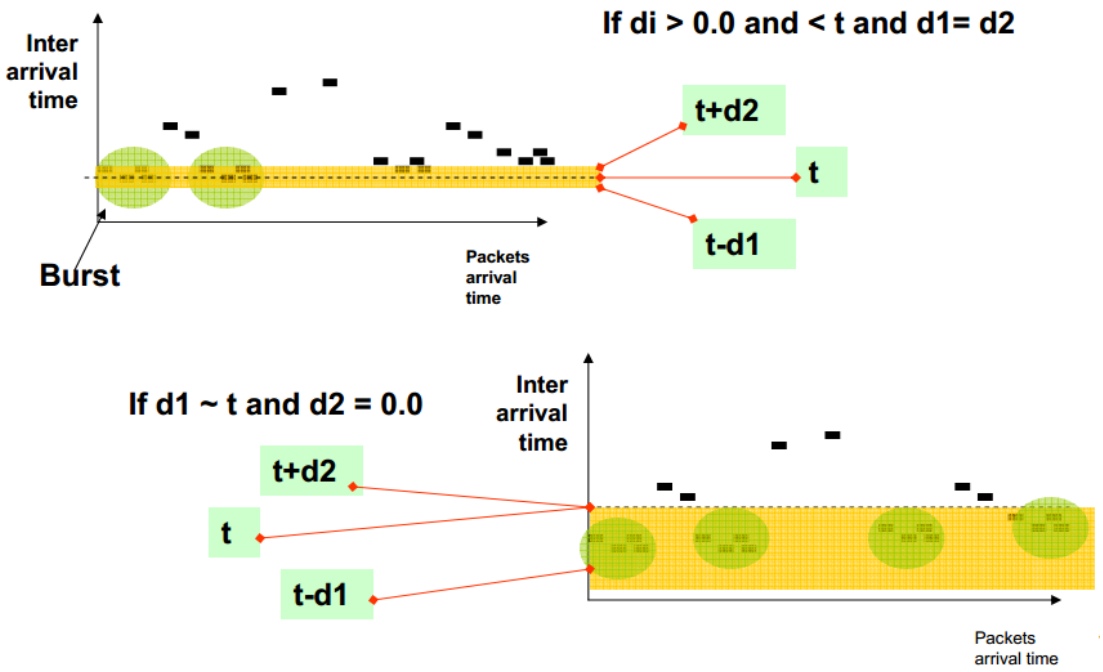


Figura 2.3. Efectos de los diferentes parámetros en la definición de las ráfagas (tomado de www.ietf.org)

2.3.2.1. Parámetros de las ráfagas

De las figuras 2.3 y 2.4 se pueden extraer elementos de análisis sobre la conformación de las ráfagas de acuerdo con el tiempo de arribo entre paquetes y la selección de los mismos para determinar el tamaño de la ráfaga. La descripción de dichos parámetros es la siguiente:

- $\boldsymbol{t_a}$**:** tiempo de arribo entre paquetes en una ráfaga (*interArrivalTime*) y se mide en milisegundo (*ms*).
- $\boldsymbol{d_{ta}}$: tolerancia en el *interArrivalTime.*
- $\boldsymbol{P_i}$**:** Tamaño del paquete i, muchas veces se considera constante para una ventana de observación, lo contrario agrega otro elemento de análisis.

De la figura 2.4 se pueden tomar varios elementos que ayudan a definir métricas sobre las diferentes ráfagas creadas a partir de la llegada de los paquetes. Para efectos estadísticos una ráfaga se puede describir como una función $\boldsymbol{B}(n, l, s)$ donde:

- $\boldsymbol{n}$: es el número de paquetes en la ráfaga, en general se requiere conocer el número mínimo de paquetes para que se cuente como una ráfaga, algunos autores sugieren que este valor mínimo absoluto sea 2.

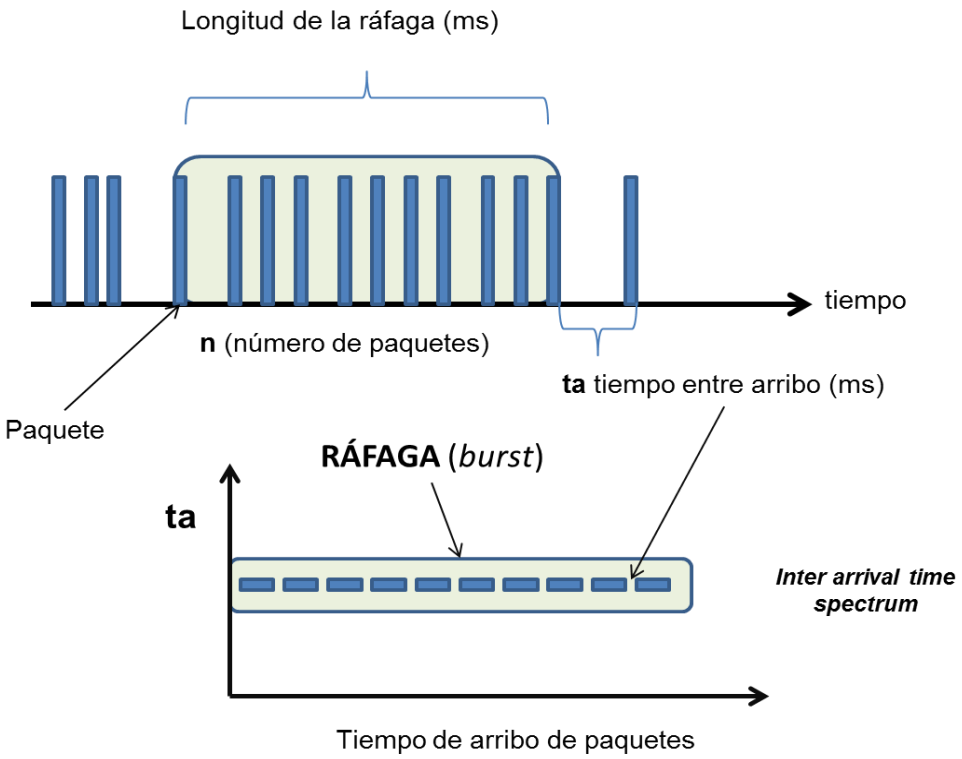


Figura 2.4. Modelo general de una ráfaga de paquetes

- $\boldsymbol{l}$: longitud de la ráfaga (en tiempo), puede medirse en milisegundos, este aspecto es importante al momento de configurar las matrices de conmutación.

- $\boldsymbol{s}$: tamaño de la ráfaga que puede darse en bytes (puede ser constante). El tamaño de los paquetes dentro de la ráfaga pueden tomar valores máximo, mínimo y promedio.

Con esta definición se puede realizar un análisis sobre el efecto de las ráfagas (*burstiness*) en las redes o sobre la caracterización del flujo de paquetes en términos de ráfagas. Aunque se propone realizar estadísticas de varios ordenes, a manera de ejemplo de muestran las estadísticas de primer orden, las cuales se describe a continuación.

- **Estadísticas de primer orden**

Al realizar el análisis estadístico de primer orden se puede tener un acercamiento a la definición del concepto de ráfaga teniendo en cuenta las siguientes acotaciones:

- Para definir el análisis de primer orden se considera inicialmente que $\boldsymbol{t_a} = c \; y \; \boldsymbol{d_{ta}} = c$.

- En seguida se pueden obtener las características de las ráfagas en un flujo de datos sobre un tiempo $\boldsymbol{T}$ de referencia para valores específicos de $\boldsymbol{t_a} \; y \; \boldsymbol{d_{ta}}$ y el tiempo de arribo entre paquetes. Estos valores se representan como escalares, en este caso $\boldsymbol{t_a}$ es el tiempo entre arribo de los paquetes (*interArrivalTime) y* $\boldsymbol{d_{ta}}$ corresponde a la tolerancia en el *interArrivalTime*.

- El número de ráfagas (#) en un tiempo $\boldsymbol{T}$ estará definido por la triada ($\boldsymbol{t_a}, \boldsymbol{d_{ta}}, \boldsymbol{P} = const$), se recuerda que $\boldsymbol{P}$ corresponde al tamaño de los paquetes.

- Separación entre ráfagas (B_{sp}), se mide en milisegundos y se realiza el cálculo de valores promedio (Avg), mínimo (min) y máximo (Max).

- La medida del tamaño de ráfaga se puede hacer en bytes (B_{sb}) con valores promedio (Avg), mínimo (min) y máximo (Max) y en número de paquetes también con valores promedio (Avg), mínimo (min) y máximo (Max).

- La frecuencia de ráfagas se mide como el número de ráfagas por unidad de tiempo (por ejemplo $Ráfagas/segundo$).

En resumen los valores escalares para obtener estadísticas de primer orden sobre las ráfagas que están siendo creadas son los siguientes:

- $\boldsymbol{t_a}$,
- $\boldsymbol{d_{ta}}$,
- (#) Número de ráfagas ($\boldsymbol{t_a}$, $\boldsymbol{d_{ta}}$) en un tiempo$\boldsymbol{T}$.
- (B_{sp}), separación entre ráfagas, con valores promedio (Avg), mínimo (min) y máximo (Max), ***B**urst **sep**aration*.

- (B_{sb}), tamaño de ráfaga en bytes, con valores promedio (Avg), mínimo (min) y máximo (Max), ***B**urst **s**ize in **b**ytes*.
- ($B_{s\#}$), tamaño de ráfagas en número de paquete, con valores promedio (Avg), mínimo (min) y máximo (Max), ***B**urst **s**ize in number of packets*.
- (B_f), frecuencia de ráfaga medida como el numero de ráfagas en el tiempo T, ***B**urst **f**requency* (# of burst / T).

La figura 2.5 muestra un ejemplo gráfico y la obtención de los parámetros antes mencionados.

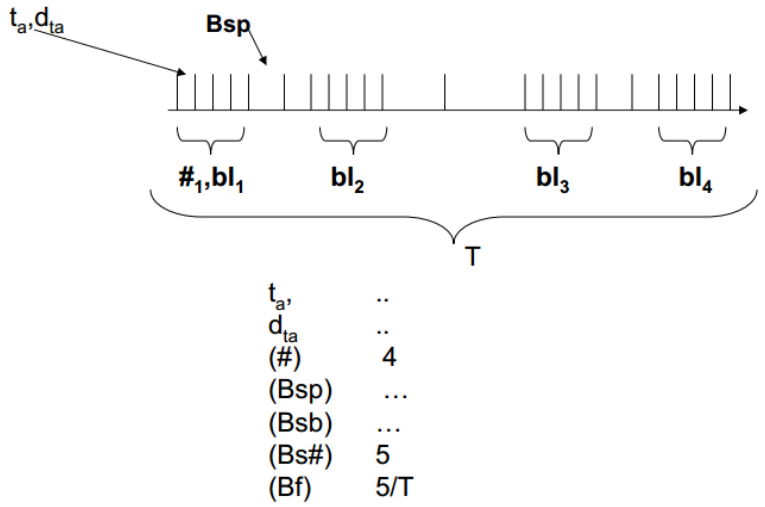


Figura 2.5. Ejemplo de referencia para la obtención de las métricas de primer orden

Tal como se usan en redes electrónicas (por mencionar ATM), el concepto de ráfaga al igual que otros conceptos heredados de dichas redes se están empleando con éxito en las redes ópticas, tanto la conmutación de circuitos como la conmutación de paquetes, en el caso de OBS las ráfagas facilitan una granularidad intermedia entre OCS y OPS.

Para los estudios a realizar en el presente documento se considera en general que la reserva de recursos se hace sin confirmación (*one way*), que el formato de la ráfaga corresponde al definido en el Capítulo 1 (reproducido en la figura 2.6) y la ráfaga está compuesta por paquetes IP, esto implica a su vez la realización de un breve recuento de las características de un paquete IP, lo cual se hace en el capítulo

siguiente. Asimismo, debido a que las ráfagas tienen un tamaño mayor al de los paquetes, los procesos de sincronización son menos exigentes, se tienen valores de milisegundos del tiempo de transmisión, igual para los tiempos de conmutación son del orden de los milisegundos y según la tecnologías de conmutación OFS (*Optical Fabric Switch*) pueden llegar a ser del orden de los nanosegundos.

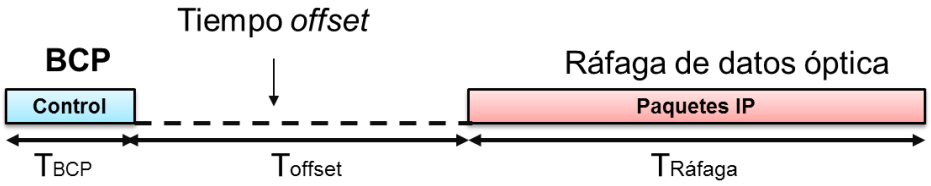


Figura 2.6. Modelo de ráfaga OBS

Con la idea según la IETF (*Internet Engineering Task Force*) acerca de la definición formal de lo que es una ráfaga de paquetes, en seguida se hace una descripción de los diferentes paradigmas empleados para la construcción o ensamble de ráfagas en redes OBS.

2.3.3. Métodos de Construcción o formación de ráfagas

Para la formación de las ráfagas en OBS se toman los paquetes que llegan a través de diferentes interfaces desde redes externas o desde niveles IP superiores, estos paquetes se clasifican principalmente por dirección de destino (nodo de egreso) y calidad de servicio (clase de tráfico IP), posteriormente son enviados al *buffer* correspondiente (cola de ensamble AQ – *Assembler Queue*), como se muestra en la figura 2.7. Este proceso se repite según el mecanismo de ensamble empleado por el nodo. Una vez que la ráfaga está conformada, se envía a un planificador el cual decide el envío del BCP y después de un tiempo *offset* se envía la ráfaga de datos.

Como se ha mencionado con anterioridad, el proceso de **ensamble de ráfagas** se lleva a cabo en los nodos borde de ingreso de las redes OBS, entonces un elemento importante dentro del presente estudio lo constituye el análisis en detalle de la arquitectura y funcionalidad de los nodos de borde o frontera (*edgeNodes*), los cuales fueron descritos en forma general en el capítulo anterior. Para ello es necesario hacer claridad sobre los siguientes aspectos:

- **Delimitación de las ráfagas**, es decir cómo determinar el conjunto de paquetes que forman parte de cada una de ellas (empleo de métodos y algoritmos de ensamble), se considera que las ráfagas pueden estar compuestas de unos pocos paquetes IP hasta un número elevado de los mismos. El valor máximo del tamaño de una ráfaga de datos se determina basado en el máximo retardo que pueden tolerar los paquetes IP presentes a la entrada de los nodos borde de ingreso.

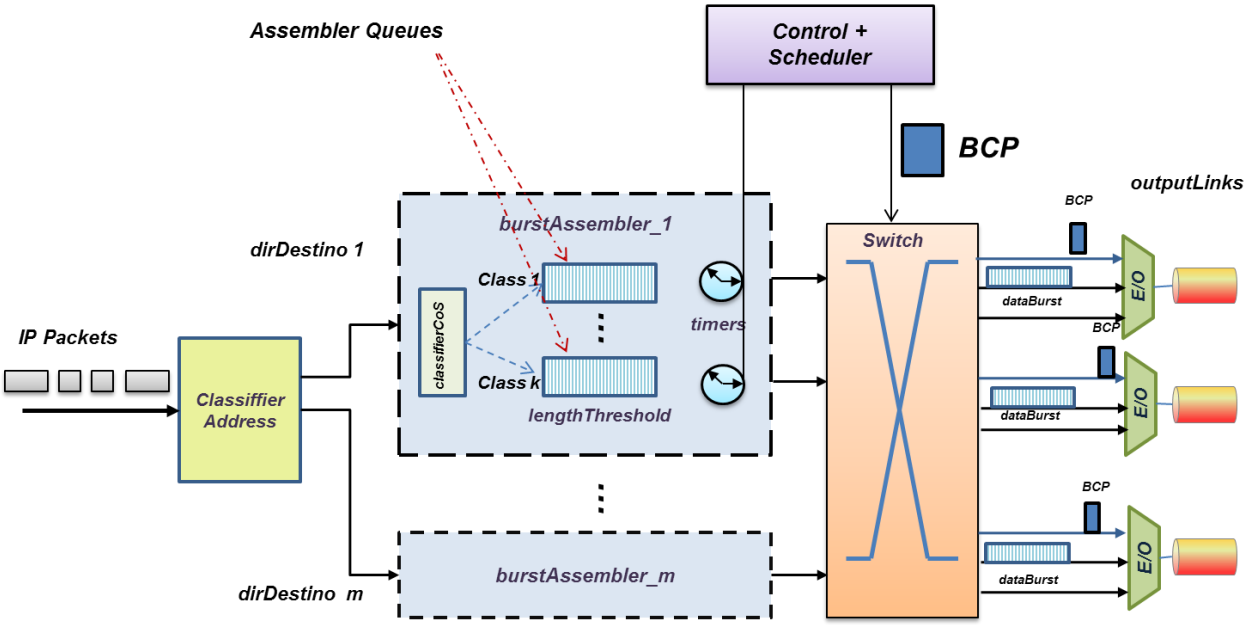


Figura 2.7. Esquema de un ensamblador de ráfagas

- Relación entre el tiempo *offset*, el tamaño de las ráfagas y los retardos que se pueden generar en el proceso de ensamble de las mismas, para revisar mejor este aspecto se puede considerar la interrelación que existe entre ellos según lo que se muestra en la figura 2.8.

  En la misma figura 2.8 los valores nombrados como extra 1 (o extra 2) corresponden al tiempo de *offset* extra para el tráfico de clase 1 (o clase 2), T_{min} es el tiempo *offset* base, T_{max} es el retardo máximo tolerado por 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 de bloqueo baja para ráfagas de datos de clase alta (clase 2), se debe asignar más *offset* que para ráfagas de clase 1. Debido a este tiempo extra, el tamaño máximo de la

ráfaga estará determinado por el máximo retardo tolerado por un paquete IP. Si n es el número de las diferentes clases de servicio existentes y no relacionadas entre sí, entonces el retardo máximo experimentado por el tráfico de clase alta será la suma de $T_{min} + TS_{max} * n + Retardo\ de\ propagación.$

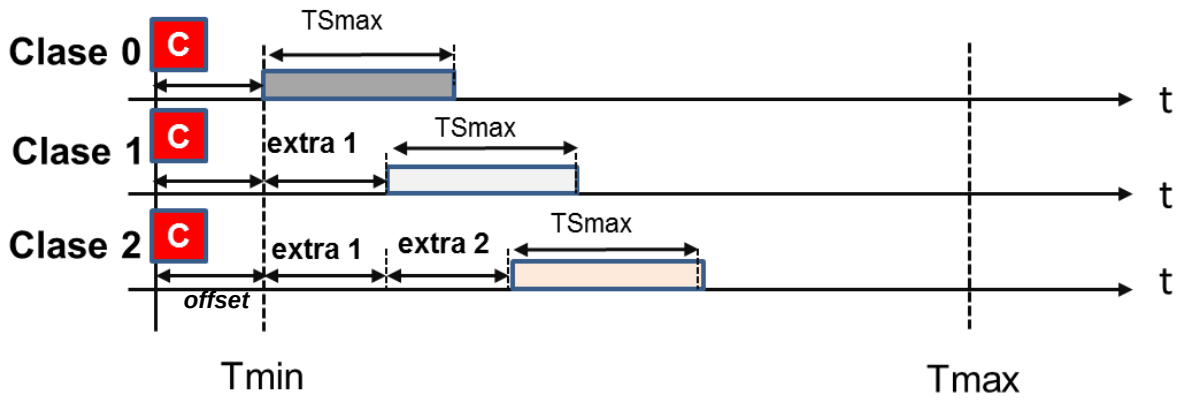


Figura 2.8. Interrelación entre el tiempo *offset* y el tamaño de la ráfaga

- Un valor mínimo del tamaño de una ráfaga de datos (denotada como $\boldsymbol{B_{min}}$) 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. La velocidad de procesamiento del canal de control limita el número de paquetes de control y ráfagas de datos transportadas por unidad de tiempo a través de un canal óptico. Por su parte, la velocidad de conmutación afecta el tamaño de la ráfaga, por lo tanto para alcanzar una alta utilización del ancho de banda, el tiempo de transmisión de la ráfaga de datos (relación tamaño de ráfaga/velocidad de canal óptico) debe ser mucho más largo que el tiempo de conmutación. Como la velocidad de conmutación es mucho mayor que otros parámetros, esta restricción se pueden considerar mínima sobre el comportamiento total de sistema. Si se considera que la ráfaga estará conformada por tráfico IP, el tamaño mínimo de la ráfaga de datos debe ser mayor o igual al tamaño máximo de un paquete o datagrama IP (64KB o 65,535 bytes), sin embargo para propósito de pruebas se pueden tomar tamaños menores a los mencionados.

- Requisitos de temporización, este aspecto se refiere al hecho de la determinación de valores de los temporizadores involucrados en el proceso de preparación y envío de las ráfagas desde los nodos frontera a través de la red OBS.

Para cumplir con el primer aspecto mencionado, se proponen cuatro (4) métodos o algoritmos para la formación de ráfagas, estos algoritmos cambian adaptativamente el tamaño de la ráfaga de acuerdo al tráfico ofrecido lo cual brinda una alta utilización de los recursos de la red con un tiempo de operación bajo. El primero corresponde al método por asignación de un umbral de tiempo (*time threshold*) o determinación de ráfagas por tiempo fijo de agregación de paquetes FBAT (de Miguel 2002), el segundo corresponde a un método de formación de ráfagas por número de paquetes o longitud. En la literatura se encuentra una gran variedad de mecanismos para el control del ensamble de ráfagas, una primera visión sobre los mismos se agrupan como:

- **Métodos básicos**: más sencillos de implementar y no exhiben las mejores prestaciones, en general los umbrales de tiempo y longitud para la conformación de las ráfagas son fijos.

- **Adaptativos**: estos métodos dependen de la variación del tráfico y pueden adaptar los valores de tiempo y umbral de longitud, en este caso se requiere que exista una forma de censar las variaciones del tráfico entrante y mediante las diferencias encontradas tratar de adaptar los valores de tiempo y longitud para responder a dicho tráfico.

- **Predictivos**: existen diferentes propuestas respecto a estos métodos, en general presentan mejores comportamientos pero son más complejos de implementar.

Sobre esta clasificación se regresa al momento de realizar el diseño de los generadores de ráfagas para las redes OBS de prueba.

2.3.4. Proceso de ensamble de ráfagas

En muchos desarrollos al momento de realizar el diseño para el proceso de ensamble de las ráfagas, además de considerar los diferentes algoritmos de ensamble, se hacen otras consideraciones entre las que cabe destacar:

- **Caracterización del proceso de arribo del tráfico**. Se puede definir mediante el empleo de modelos probabilísticos para el estudio de la correlación de tiempo

para una fuente o para múltiples fuentes. Si N fuentes se superponen, entonces la matriz de superposición será: $Q = qiXq2X \ldots XqN$ siendo $\boldsymbol{X}$ el producto de Kronecker. Las fuentes se modelan en dos estados (ON/OFF) *Markov Modulated Poisson Process* (MMPP). La figura 2.9 muestra un diagrama simple en el tiempo de dichos procesos generados en Matlab™, de otro lado, este acercamiento tiene un buen comportamiento cuando se trata de simular fuentes IP que tienen comportamiento de tráfico auto similar (*selfsimilar*) o por ráfagas (*burstiness*).

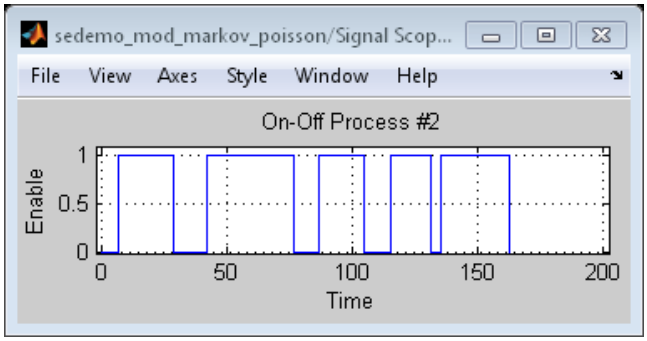


Figura 2.9. Modelo Poisson ON-OFF

- **Lo que se asume**. La colas de ensamble se pueden modelar asumiendo que:

  - El proceso de arribo de los paquetes es MMPP.
  - El tiempo se divide con intervalos de tiempo iguales al tiempo de transmisión de los paquetes. Para enlaces con poco ancho de banda, la fuente solo puede enviar un paquete dentro del *slot* o intervalo de tiempo cuando está en **ON**.
  - Conexiones de alta velocidad pueden enviar proporcionalmente un gran número de paquetes aproximadamente cerca de un número entero dentro de un *slot*.
  - No se consideran transmisiones fraccionales, las ráfagas siempre incluyen paquetes completos y no fracciones de ellos.

- Se considera que los enlaces de acceso no son más rápidos que los enlaces entre nodos del *core*.
- Conjunto de trayectos, los trayectos a seguir por las ráfagas pueden ser el resultado de un cálculo previo de los mismos o un cálculo dinámico en la medida que se requiere.

- Distribución de la longitud de las ráfagas a la salida del *burstifier*, algunas veces se considera de tipo exponencial aunque se puede asimilar a otras funciones de distribución.

Todas estas anotaciones sumadas a otras que aparecen seguidamente serán consideradas para el desarrollo de los diseños.

2.4. Algoritmos de Ensamble de ráfagas

Como se comentó con anterioridad, en OBS el ensamble de las ráfagas ocurre en los nodos de borde (*edge Nodes*) mediante el uso de *buffers* o memorias electrónicas (ver figura 2.7). Como se lee en Yu, Qiao & Liu (2004), los paquetes que van a ser encaminados a través de la red se colocan en estos *buffers* ordenados principalmente con base en la dirección de destino de los mismos (aunque se pueden ordenar de acuerdo con requisitos de calidad de servicio QoS (*Quality of Service*), clases de servicios, prioridades, entre otros.), este proceso se sigue hasta que se cumpla o alcance una condición determinada. Esta condición puede estar basada en la definición de un límite para el tamaño de la ráfaga, un tiempo límite para el almacenamiento de paquetes en el *buffer* o la combinación de las dos, este proceso permite un acople suave del tráfico presente a la entrada del nodo OBS el cual es mayoritariamente en ráfagas (especialmente cuando se trata de tráfico IP).

Una vez que la ráfaga ha sido ensamblada, la red OBS activa la señalización desde el plano de control (tener en cuenta la figura 1.34) para enviar la ráfaga al nodo de destino a través de la red, esto permite establecer el camino por demanda y no su establecimiento previo[22] dada la naturaleza de las ráfagas (corta duración). El plano de control envía un paquete de control BCP que ayuda a configurar la matriz de conmutación para la transmisión de la ráfaga al siguiente nodo, esto sucede antes que la ráfaga de datos llegue al nodo, este proceso se repite nodo a nodo hasta que la ráfaga llegue al destino.

La exactitud en la elección del algoritmo de ensamble de las ráfagas puede impactar grandemente el desempeño y operación total de la red OBS debido a que este

[22]A diferencia de OCS donde el circuito se establece previamente al envío de la información.

aspecto permite a los diseñadores de la red controlar las características de la ráfaga y además permite conformar el tráfico entrante.

Según se consigna en Maier (2008, pp.109-112), en general los algoritmos empleados para el ensamble de ráfagas se clasifican en:

- Algoritmos basados en tiempo, (*time-based*).
- Algoritmos basados en longitud de ráfaga, (*burstlength-based*).
- y el algoritmo mixto o híbrido, (*mixed time/burstlength-based*).
- Algoritmos de ensamble dinámicos.

2.4.1. Esquema basado en el tiempo T

En el esquema de ensamble de ráfagas basado en tiempo o *time-based* se define un temporizador o *timer* el cual se inicializa al comienzo de cada nuevo ciclo de ensamble. Después de un tiempo T, todos los paquetes que arriban en este periodo son ensamblados en una ráfaga.

El valor del *timeout* o T para el esquema *timer-based* se debe seleccionar con mucho cuidado ya que si dicho valor es muy grande, el retardo que experimenta un paquete en el nodo de frontera puede ser intolerable. De otro lado si el valor es muy bajo, se pueden generar muchas ráfagas muy pequeñas lo que puede resultar en un alto sobre encabezado (*over head*) debido a la gran cantidad de paquetes de control o BCP generados. En otras palabras, el valor asignado a T limita el retardo que pueden experimentar los paquetes en la cola de ensamble con un valor máximo cuando la carga de tráfico es baja, y el valor asignado a B permite reducir el retardo innecesario que puede experimentar una ráfaga cuando la carga de tráfico es alta.

2.4.2. Esquema basado en longitud de ráfaga B

En este algoritmo el valor B es usado como criterio para enviar una ráfaga, es decir la ráfaga es transmitida tan pronto como arriba el paquete que cumple con el umbral B. En este esquema se propone usar un umbral con una longitud máxima de ráfaga (o valor máximo de ráfaga, denominado B_{max}). En este caso, una ráfaga es ensamblada cuando un nuevo paquete arriba haciendo que la longitud total de la

actual ráfaga exceda dicho umbral, con frecuencia también se requiere contar con un valor mínimo de tamaño de ráfaga o $\boldsymbol{B_{min}}$, este valor es necesario para evitar tener ráfagas con tamaños muy pequeños lo cual hace que el ancho de banda no sea mejor utilizado y evidenciando además otras desventajas.

Los dos métodos anteriores experimentan dificultades cuando existe una variación apreciable en el tráfico ofrecido debido al hecho de considerar un único criterio de ensamble (tiempo o umbral de longitud de ráfaga), como se aprecia en la figura 2.10 y dependiendo si hay alto o bajo tráfico se considera el impacto del valor umbral para el tamaño de la ráfaga $\boldsymbol{B}$ y del valor del umbral de tiempo $\boldsymbol{T}$. Es así como bajo carga de tráfico liviana no se tienen limitaciones de retardos para los paquetes que esperan ser agregados en una ráfaga de tamaño $\boldsymbol{B}$.

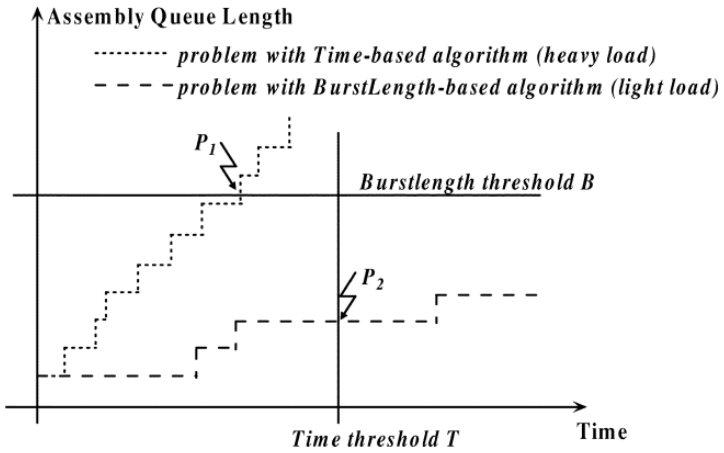


Figura 2.10. Algoritmos de ensamble por tiempo y longitud de ráfaga. Yu, Qiao & Liu (2004)

Como resultado, el algoritmo de ensamble basado en longitud de ráfaga no puede garantizar límites al promedio o al máximo retardo en la cola de ensamble. Por su parte, el algoritmo de ensamble basado en tiempo puede resolver este problema ya que puede enviar la ráfaga después de un tiempo $\boldsymbol{T}$ sin importar cuantos paquetes hay en la ráfaga, tal como lo muestra la figura 2.10 en el punto $\boldsymbol{P_2}$. De otro lado este mecanismo basado en el tiempo podría hacer aumentar el retardo experimentado por un paquete bajo condiciones de alto tráfico. Es así como en estas condiciones de alto tráfico el mecanismo de ensamble basado en longitud de ráfaga puede enviar la ráfaga en el punto $\boldsymbol{P_1}$.

Los anteriores algoritmos de ensamble son los considerados básicos y se toman en reiteradas ocasiones como elementos de contraste cuando se realizan estudios sobre su comportamiento o cuando se proponen nuevos algoritmos de ensamble, aunque no son dinámicos, constituyen parte de la presente Tesis y los modelos de redes para simulación se construyen con base en estos mecanismos de ensamble.

La figura 2.11 muestra como estos métodos básicos con valores $\boldsymbol{T}$ y $\boldsymbol{B}$ fijos operan en el proceso de ensamble de ráfagas.

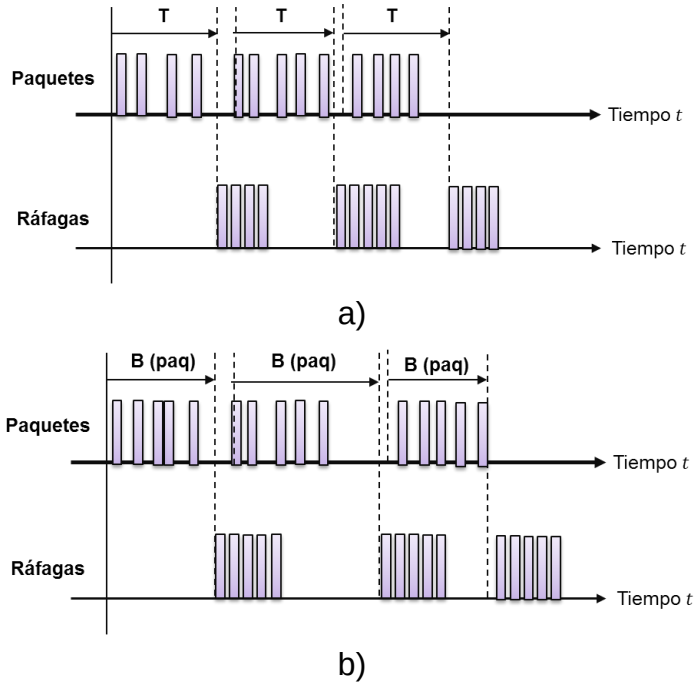


Figura 2.11. Operación de los métodos básicos a) por tiempo fijo $\boldsymbol{T}$ y b) por longitud fija $\boldsymbol{B}$ (B=5)

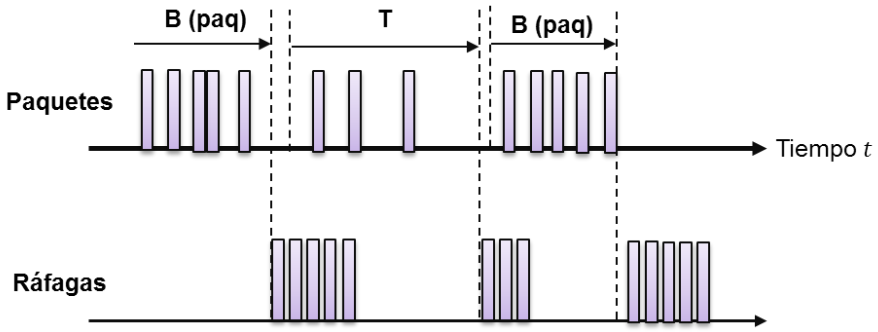
2.4.3. Algoritmo mixto o híbrido

Se presenta el tercer algoritmo que está basado en el umbral que primero se alcance (Maier 2008, p.110), o algoritmo hibrido (*mixed time/burstlength-based*), es decir que mientras en la clase de algoritmos (*timer-based*) pueden resultar ráfagas de longitudes no deseables, en el esquema basado en la longitud de la ráfaga (*burstlength-based*) no brinda la garantía sobre el retardo que pueden experimentar los paquetes.

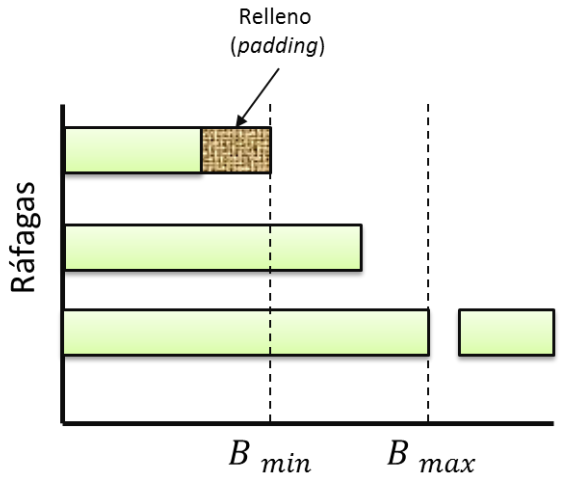
Para manejar la diferencia que se puede presentar entre los dos esquemas, se propone el esquema mixto (*mixed*) el cual permite que una ráfaga sea enviada una vez se cumpla el tiempo o cuando se alcance la longitud fijada (lo que ocurra primero).

Si el tamaño de la ráfaga alcanza el valor umbral $\boldsymbol{B_{max}}$, o si el tamaño de la ráfaga ensamblada es menor que $\boldsymbol{B_{min}}$ y si el tiempo $\boldsymbol{T}$ se ha cumplido, la ráfaga será enviada al núcleo de la red, en caso de no completar el valor mínimo en el tiempo $\boldsymbol{T}$, antes de ser enviada se propone realizar un relleno a la ráfaga hasta completar su tamaño mínimo. Según el análisis hecho por Izal *et al.* (2006), este proceso del relleno (o *padding*) puede ocasionar problemas en el *througput* total de la red ya que en principio se debe identificar cual es la longitud real de la ráfaga, lo que implica definir un indicador de longitud LI (*Length Indicator*) para que en el nodo de destino se identifique el relleno de los datos válidos, igualmente, el *padding* ocupa ancho de banda que podría ser usado por otras conexiones. Esto implica un uso no adecuado de los recursos existentes, entonces en la medida que soluciona un problema al no transmitir ráfagas muy pequeñas que pueden parecer paquetes, suma complejidad a la implementación del proceso de ensamble y desensamble de las ráfagas de datos.

Como en el caso anterior, la figura 2.12 a) y b) muestra el proceso de este algoritmo, se observa cómo la ráfaga queda ensamblada cuando se cumple uno u otro valor umbral, igualmente se observa el proceso de relleno cuando no se alcanza a completar el umbral mínimo.



a)



b)

Figura 2.12. Método híbrido para ensamble de ráfagas en OBS, a) $\boldsymbol{T}$ y $\boldsymbol{B}$ lo que suceda primero, b) empleo del relleno para completar $\boldsymbol{B_{min}}$

Azodolmolky, Tzanakaai & Tomkos (2006) muestran como los procesos de ensamble por tiempo y tamaño de ráfaga estáticos tienen un buen comportamiento ante el trafico auto similar, pero se muestra como un algoritmo adaptativo se comporta mejor ante el desempeño de la red que los que manejan valores fijos o estáticos. La figura 2.13 muestra en resumen la operación del algoritmo híbrido.

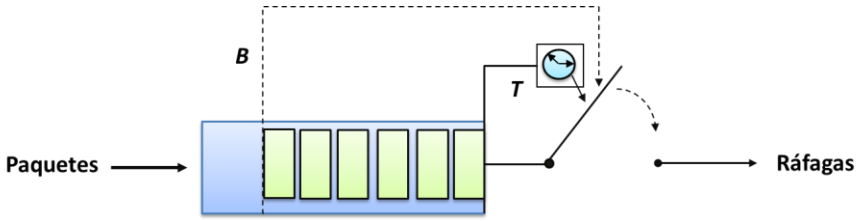


Figura 2.13. Operación del algoritmo hibrido para ensamble de ráfagas en OBS

2.4.4. Algoritmos Adaptativos

Para una elección más adecuada de $\boldsymbol{T}$, $\boldsymbol{B_{min}}$ y $\boldsymbol{B_{max}}$ se han propuesto algoritmos adaptativos para optimizar el desempeño de las redes OBS donde los esquemas por tiempo y por longitud son ajustados dinámicamente de acuerdo con las medidas de tráfico en tiempo real. Estos proveen un mejor desempeño especialmente con un

tráfico entrante de paquetes fuertemente correlacionado aunque se aumenta la complejidad de su operación.

Liu, Ansari & Ott (2003), proponen un algoritmo de ensamble de ráfagas avanzado, el cual promete por medio de métodos de predicción lineal definir la longitud de la siguiente ráfaga en ser generada. Se lo conoce como algoritmo FRR (*Forward Resource Reservation*) y realiza los pasos de predicción, pre-transmisión y examinación.

2.4.5. Consideraciones de tiempo y longitud

En seguida se hace un análisis con mayor detalle de los diferentes algoritmos para ensamble de tráfico de paquetes (preferiblemente IP) de entrada en ráfagas OBS definidos en la actualidad. Para su definición se consideran los dos factores que pueden afectar los retardos de los paquetes y la posible pérdida de los datos, se trata del tiempo de ensamble y la longitud de la ráfaga a ensamblar.

- **Algoritmo Ensamble de ráfaga por Tiempo Fijo y Longitud Mínima de ráfaga (***Fixed-Time-Min-Length Burst Assembly***)**, este algoritmo emplea como primer criterio un Tiempo fijo $\boldsymbol{T}$ de ensamble y con base en este criterio requiere que el tamaño de cada ráfaga a ensamblar (en una cola de ensamble de ráfaga) tenga una longitud al menos de un valor mínimo (longitud mínima). En seguida se detalla el procedimiento para este algoritmo:

  Se define un tiempo de ensamble fijo $\boldsymbol{T}$ y una longitud de ráfaga mínima $\boldsymbol{B_{min}}$. Normalmente se tiene que $\boldsymbol{B_{min}} < \boldsymbol{T} * \lambda$, donde λ es el promedio de la velocidad de arribo de tráfico. Se asume que la cola de ensamble de ráfaga comienza a recolectar datos para la $i - ésima$ ráfaga a un tiempo cero (0), y se denota el arribo de los datos en un tiempo t como $p_i(t)$. En este caso, $p_i(0) = 0$, en principio el índice de ráfaga *i* se fija a 0. El siguiente algoritmo describe los pasos a seguir:

  1. Cuando un paquete llega a una cola de ensamble de ráfaga vacía, se inicia el contador de tiempo como $t = 0$, el cual se incrementa con el tiempo;
  2. Cuando $t = T$

if $p_i(t) \geq B_{min}$ **then**

Enviar inmediatamente todos los datos recolectados $p_i(t)$ como una ráfaga B_i.

else

Aumentar el tamaño de los datos al valor $\boldsymbol{B_{min}}$ (rellenar) y enviar la ráfaga B_i inmediatamente

end if

3. Incrementar el índice de ráfaga ($i++$) y regresar al paso 1.

- **Algoritmo de ensamble de ráfagas *Max-Time-Min-Max-Length*** (*Max-Time-Min-Max-Length Burst Assembly*), este algoritmo emplea como criterio inicial el tiempo máximo de ensamble y permite disminuir el retardo de un paquete individual, este algoritmo también facilita el envío de una ráfaga de datos una vez que ella alcanza o excede la longitud máxima de ráfaga. A continuación se detalla su funcionalidad:

Inicialmente, se fija la longitud máxima de ráfaga denotada como $\boldsymbol{B_{max}}$ y $\boldsymbol{B_{min}}$ como longitud mínima de ráfaga, al mismo tiempo se define $\boldsymbol{T}$ como el tiempo máximo de ensamble de ráfaga. En general se tiene que $\boldsymbol{B_{min}} < \boldsymbol{T} * \boldsymbol{\lambda} < \boldsymbol{B_{max}}$. Igualmente, se denota $p_i(t)$ a los datos acumulados en la $i-ésima$ ráfaga en un tiempo *t*. Se evidencia que al contrario que lo expresado en el algoritmo anterior, $p_i(0)$ puede no ser igual a cero debido al posible remanente que haya quedado de la ráfaga previa *i-1* cuando su valor sea superior a $\boldsymbol{B_{max}}$.

En seguida se presenta el algoritmo propuesto:

Si el *buffer* no está vacío o cuando nuevos paquetes arriban, se inicia el temporizador en cero el cual se incrementa con el transcurso del tiempo;

1. if $p_i(t) \geq \boldsymbol{B_{max}}$ **then**

go step 2;

end if

2. if $t \geq \boldsymbol{T}$ **then** ***//*** se alcanza el tiempo máximo**.**

if $p_i(t) < \boldsymbol{B_{min}}$ **then**

aumentar el tamaño de los datos al valor $\boldsymbol{B_{min}}$ (relleno) y enviar la ráfaga ***Bi*** inmediatamente;

else if $p_i(t) \leq \boldsymbol{B_{max}}$ **then**

enviar los datos inmediatamente como una ráfaga **i**; //se ha superado el mínimo

end if

aumentar i;

end if

while (el tamaño total de los datos en el buffer de ensamble no sean mayores a $\boldsymbol{B_{max}}$) **do**

Extraer una ráfaga de longitud ***B*** del buffer y enviarla inmediatamente como la ráfaga **i**, incrementar i;

end while

Vaya al paso 1;

- Se nota que si el tiempo $\boldsymbol{T}$ (tiempo de ensamble máximo) en el segundo algoritmo se fija en un valor muy pequeño en relación con $\boldsymbol{B_{max}}$, la longitud de la ráfaga ensamblada nunca alcanza el valor $\boldsymbol{B_{max}}$ antes de ser enviada debido a que el temporizador se vence antes. El segundo algoritmo trabaja igual al primer algoritmo con un tiempo $\boldsymbol{T}$ fijo, en otras palabras, este algoritmo puede ser un caso especial del segundo algoritmo cuando $\boldsymbol{T} * \boldsymbol{\lambda} << \boldsymbol{B_{max}}$. Sin embargo, $\boldsymbol{B_{max}}$ puede ser muy pequeño comparado con $\boldsymbol{T}$ entonces, los dos algoritmos se pueden tratar separadamente.

2.4.6. Ejemplos de algoritmos dinámicos para ensamble de ráfagas

Dada la importancia de los mecanismos de ensamble dinámicos, se describe uno de estos algoritmos, el cual dado el caso se puede sugerir como base en el diseño del comportamiento de los métodos cognitivos a desarrollar el en siguiente Capítulo.

- **Algoritmo de ensamble basado en histéresis**

Se trata de la propuesta de un algoritmo dinámico basado en el concepto de histéresis para resolver posibles problemas de bloqueo, minimizar la frecuencia de operación del *timer* mientras se maximiza el empleo de las ráfagas y ofreciendo un

tamaño variable de las ráfagas. Para su operación se requiere realizar un rastreo o seguimiento al tráfico que llega al nodo borde de ingreso y en esta medida se debe ajustar el tamaño de la ráfaga. Dicho ajuste se realiza para relajar la transición entre los diferentes valores de longitud que puede tomar de la ráfaga.

Las figuras 2.14 y 2.15 muestran los modelos propuestos y el esquema para definir el tamaño de la ráfaga dependiendo de los límites de tiempo (límite mínimo y límite máximo).

En particular, la figura 2.15 muestra que cuando se requiere un tiempo largo para generar una ráfaga cuando la carga de tiempo es baja, se debe poner un límite al tiempo de espera de los paquetes en las ráfagas que están siendo ensambladas para evitar que dicho tiempo de espera sumado al retardo de transferencia de las ráfagas por la red supere los límites permitidos para los paquetes IP.

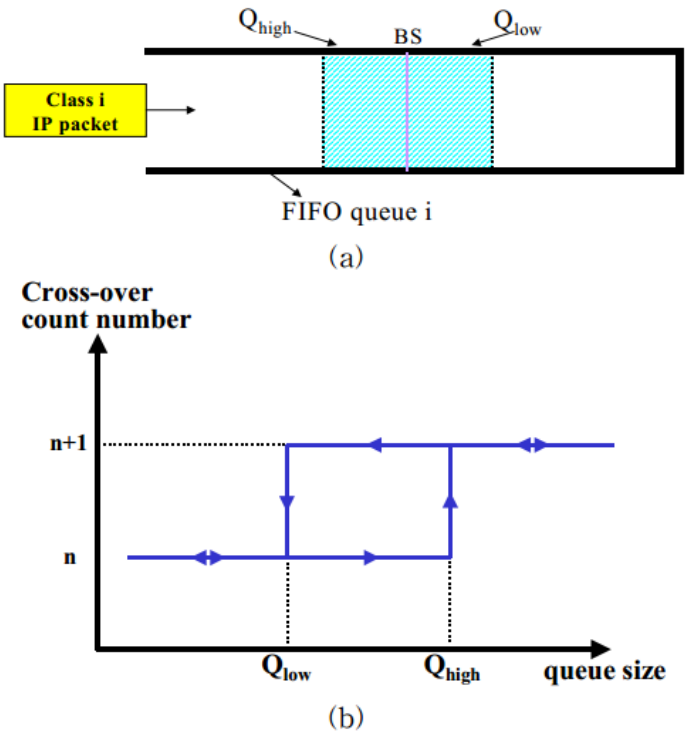


Figura 2.14. a) Modelo de cola FIFO y b) características de histéresis

La figura 2.16 muestra un diagrama de flujo basado en la conformación de colas de ensamble y valores umbrales para realizar el cálculo del tamaño dinámico de una

ráfaga de datos. En este caso $\boldsymbol{BS}$ (*Burst Size*) corresponde a la variable que mide el tamaño de la ráfaga a ensamblar, $\boldsymbol{Thi}$ es el valor umbral definido para el tiempo de ensamble de ráfaga, las otras variables se incluidas en el algoritmo se explican con la descripción del diagrama de flujo.

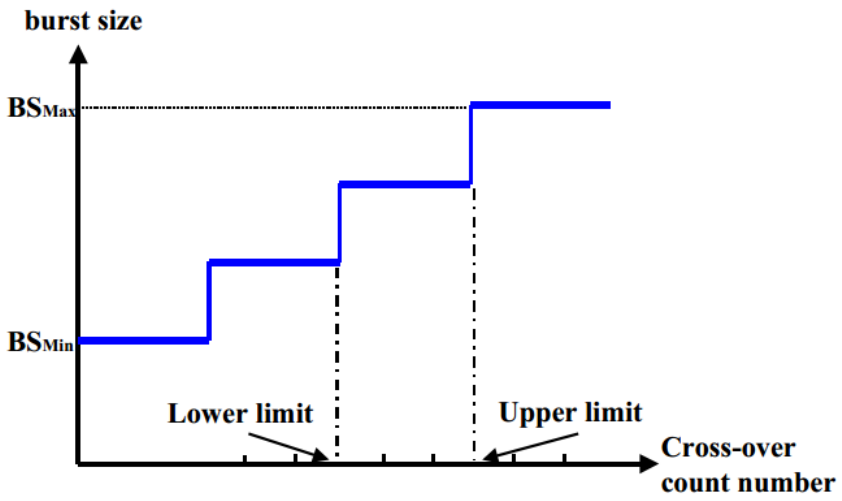


Figura 2.15. Esquema de tamaño de ráfaga tipo estado (contador *cross over*)

En resumen los pasos a seguir para el ensamble de la ráfaga son:

1. El temporizador comienza a contar una vez que el primer paquete llega a la cola. Si el valor del temporizados (*timer*) alcanza el valor umbral $\boldsymbol{T}$ o si el valor del *timer* es menor que el umbral y el tamaño de la ráfaga es mayor que Q_{low}, se ha creado una nueva ráfaga.

2. Si el tamaño de la cola es mayor que Q_{high}, el contador se incrementa en 1. Si el tamaño de la cola es menor que Q_{low}, el número del contador se disminuye en 1.

3. El valor del contador (*cross over*) se compara con los limites alto y bajo. Si esta ha superado el umbral o es menor, el tamaño de la ráfaga se incrementa o disminuye en un estado. Este proceso se repite haciendo que el tamaño de la ráfaga se adapte de acuerdo con el tráfico entrante.

4. Se fija el contador a cero y el proceso empieza de nuevo.

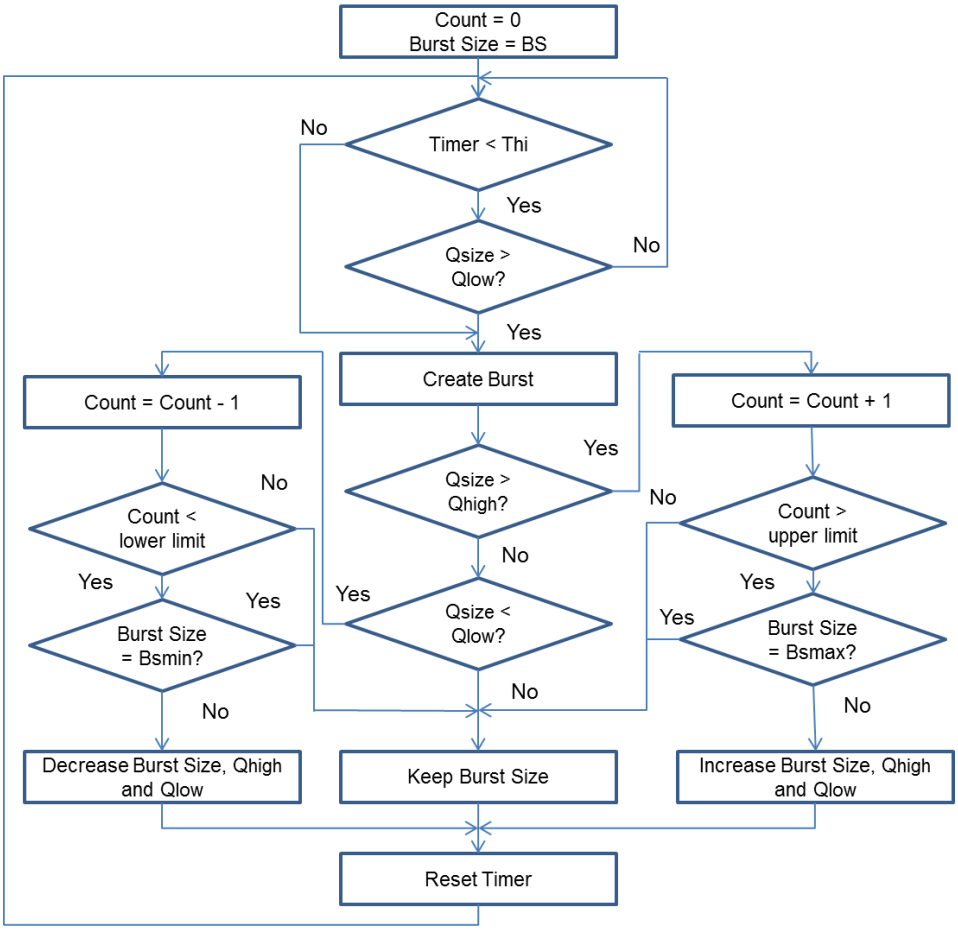


Figura 2.16. Algoritmo para el cálculo dinámico del tamaño de ráfaga

Este algoritmo genera un tamaño de ráfaga que se adapta al tráfico entrante y minimiza el tamaño de las mismas para el caso del comportamiento en ráfagas del tráfico IP. Igualmente, como se puede ajustar el valor del tiempo $\boldsymbol{T}$ es posible ajustar el tiempo de espera de los paquetes IP en el proceso de ensamble cuando se ofrece tráfico de carga baja. La importancia de este algoritmo radica en la posibilidad de adaptar el tamaño de la ráfaga respecto a la variación del tráfico, aspecto que puede mejorarse con técnicas de aprendizaje de máquina ML (*Machine Learning*).

Finalmente y a manera de resumen, la tabla 2.1 muestra los diferentes tipos de algoritmos de ensamble propuestos y sus respectivas referencias, estos algoritmos son los básicos que por lo general se eligen para realizar pruebas y estudios sobre mecanismos de ensamble en OBS.

Tipos de Algoritmos de ensamble	Referencias de algoritmos propuestos
Con base en un tiempo umbral $\boldsymbol{T}$ fijo	Ge, Callegati & Tamil (2000), Kozlovski *et al.* (2001), Li *et al.* (2002), De Vega & Goetz (2004)
Con base en tamaño de ráfaga (B_{min} y B_{max})	Zapata & Bayvel (2003), Vokkarane, Haridoss & Jue (2002), Jue & Vokkarane (2005), Hu, Dolzer & Gauger (2003)
Hibrido (lo que ocurra primero)	Oh & Kang (2002), Yu, Chen & Qiao (2002)
Selección aleatoria	De Vega & Goetz (2004)
Adaptativo (los valores de $\boldsymbol{T}$ y $\boldsymbol{B}$ dependen de las características del tráfico presente a la entrada o las condiciones de tráfico en la red)	Maier (2008), Jue & Vokkarane (2005), Mangwala & Ekabua (2013), Azodolmolky, Tzanakaai & Tomkos (2006), Choudhury *et al.* (2008)

Tabla 2.1. Algoritmos de ensamble de ráfagas

Otros esquemas de ensamble y la definición de algoritmos se enuncian en seguida.

- **Algoritmo de ensamble con predicción de tráfico**

Los algoritmos con predicción de tráfico son importantes al momento de hacer una elección de los parámetros de ensamble (tiempo y longitud), cuando se realiza una elección adecuada de estos parámetros se reduce notablemente el retardo de ensamble de ráfagas, algunos autores (Sideri & Varvarigos 2007) proponen algoritmos que trabajan con base en el comportamiento de filtros de predicción lineal lo cual permite calcular el número de paquetes que arriban al nodo y así ayudan a reducir el retardo promedio experimentado por los paquetes durante el proceso de ensamble de la ráfagas. Algunos de estos algoritmos son:

- **Algoritmo ATH-FMTL (*Adaptive-Threshold with Fixed Maximum Time Limitation Algorithm*)**

Este algoritmo busca el equilibrio entre la velocidad de los paquetes que llegan al nodo y la velocidad de transmisión de las ráfagas, emplea longitud de ráfaga óptima y fija un tiempo máximo. La operación de este algoritmo es la siguiente:

1. Los paquetes llegan al puerto correspondiente y se llevan a una cola de ensamble con base en la clase de servicio.

2. Para clasificar los paquetes en la ráfaga apropiada, la decisión se toma con base en el hecho que cada paquete tiene una “tolerancia al retardo” que se permite para efectos de flexibilidad durante el encaminamiento de los paquetes y sobre el supuesto que los paquetes no presentan una tolerancia al retardo menor que la cantidad de tiempo que se toma para encaminar el paquete a través de la red empleando la ruta más corta hasta el destino.

3. Cada longitud de la ráfaga se estima al final del tiempo de predicción TP (*Prediction Time*) de acuerdo o con el valor de la longitud de la ráfaga pasada y el tráfico actual que está arribando.

4. El nodo de borde determina la duración variable de ensamble de la ráfaga o VBAD (*variable burst assembly duration*) estimando el tamaño de la ráfaga con la carga actual o previa.

5. El paquete de control se envía al núcleo OBS al tiempo τ; siendo $\tau = ta - to$ (ta: tiempo de ensamble; to: tiempo *offset*).

6. Se asume que la conversión de longitud de onda está disponible en cada enrutador LSR (*Label Switch Router*) en el núcleo o *core* y se emplea el mecanismo de reserva JET (*Just-Enough-Time*).

7. Se emplea el esquema de planificación LAUC-VF (*The Latest Available Unused Channel with Void Filling*).

Sideri& Varvarigos (2007), proponen tres algoritmos de ensamble de ráfagas los cuales se basan en la estimación del número de paquetes esperados. Al final de cada trama de tiempo, se requiere tomar la decisión sobre si enviar la ráfaga o comenzar una nueva ráfaga o que el nodo de borde pueda esperar por más paquetes de la siguiente trama. Para que esta decisión se tome, un filtro de predicción lineal realiza la estimación del número de paquetes que llegan cuando la trama $(n + 1)$ es usada. Los tres algoritmos que se basan en este principio son:

Algoritmo de umbral fijo de paquetes adicionales (*Fixed Additional Packets Threshold Algorithm* o N_{MIN} *algorithm*), algoritmo de umbral de paquetes adicionales proporcionales (*Proportional Additional Packets Threshold Algorithm* o αL *algorithm*) y el algoritmo de umbral de retardo promedio (*Average Delay Threshold Algorithm* o TA *algorithm*). En la referencia citada al comienzo, se encuentra más información sobre esta propuesta, es proceso de predicción puede ser enfocado desde la perspectiva de algoritmos predictivos los cuales en su mayoría toman elementos de modelamiento predictivo, aprendizaje de máquina y minería de datos los cuales tienden a analizar la situación actual y los hechos históricos para plantear predicciones acerca del futuro o proponer eventos desconocidos, una herramienta que puede ayudar a realizar esta serie de algoritmos son las redes neuronales artificiales ANN (*Artificial Neural Networks*), sobre las cuales se propone una solución para control de los mecanismos de ensamble.

- **Algoritmo de selección aleatoria**

El algoritmo de selección aleatoria, propuesto por de Vega & Goetz (2004), se basa en asignar a cada paquete que entra en el ensamblador un valor cero o un uno. El nodo OBS tiene un generador de números aleatorios de Bernoulli para obtener esta secuencia de 1's y 0's con cierta probabilidad p para los 1's y $(1-p)$ para los 0's. Cada vez que se asigna un 0 a un paquete, se agrega a la ráfaga que se está formando, mientras que si se asigna un 1, se termina la ráfaga y se comienza una nueva. El parámetro p del generador de números aleatorios de Bernoulli tiene un significado muy intuitivo, representa la inversa del número de paquetes IP por ráfaga. En este estudio se muestra que la propiedad más importante del algoritmo de selección aleatoria es que el proceso de generación de ráfagas que se obtiene tras aplicar este algoritmo es un proceso de Poisson puro, algo que no se consigue con el resto de algoritmos. En la literatura es frecuente asumir que el proceso de generación de ráfagas es un proceso de Poisson, ya que facilita en gran medida obtener expresiones analíticas.

Otros algoritmos adaptativos

Como se ha descrito a lo largo del presente capitulo, el funcionamiento de los algoritmos basados en temporizador o tamaño de ráfaga es independiente del

comportamiento del tráfico, es decir, de la frecuencia con la que llegan los datos, el tamaño de los paquetes, etc. Es posible mejorar el comportamiento de los algoritmos anteriores adaptando su funcionamiento a las características del tráfico existente en cada momento. En estos algoritmos los valores del temporizador y/o del tamaño de las ráfagas se ajustan continuamente.

- **Algoritmo con Periodo de ensamble adaptativo AAP (*Adaptive Assembly Period*)**

Cao *et al.* (2003) proponen un mecanismo adaptativo denominado AAP (*Adaptive Assembly Period*) para mejorar el rendimiento por el cual, para cada nueva ráfaga se calcula el valor del temporizador $\boldsymbol{T}$. Este valor depende del tamaño que han alcanzado las ráfagas anteriores. En concreto, el valor del temporizador, denominado AP (*Assembly Period*), se calcula de manera independiente para cada cola de transmisión y tiene en cuenta el ancho de banda disponible para transmitir y el tamaño medio de las ráfagas en la cola de ráfaga correspondiente. El valor de este tamaño medio es una ponderación entre el último valor medido y la media hasta este momento.

Los mismos autores proponen dar un mayor peso al valor de la última ráfaga frente a la media resultante hasta ese instante, sugiriendo una relación de 3/4 frente a 1/4. La razón principal de dar más peso a la última ráfaga es que después de una ráfaga muy grande, es probable que se continúe con un elevado ritmo de transmisión. En cambio, si hay pocos paquetes es probable que haya habido algún tipo de reducción en la tasa de transferencia (por ejemplo si se trata de tráfico TCP), por lo que se espera que lleguen pocos paquetes, y para que tengan que esperar poco tiempo, se reduce su temporizador.

- **Temporizador de ensamblado dinámico (DT-BA) para reducir consumo energético**

Kang *et al.* (2010) definen un algoritmo de ensamblado basado en temporizador dinámico DT-BA (*Dynamic Time based Burst Assembly*) con el objetivo de minimizar el consumo energético del nodo y ofrecer garantías de retardo. El algoritmo calcula el temporizador de ensamblado de la ráfaga acorde al estado de la cola y las

tendencias en el tráfico. El algoritmo asume que mientras se está ensamblando la ráfaga, se opera en modo de bajo consumo, y mientras se transmite la ráfaga, es cuando el consumo es elevado. Bajo estas premisas, el algoritmo mantiene dos umbrales, el umbral alto y el umbral bajo. Si el tamaño de la última ráfaga está por debajo del umbral bajo, se entiende que hay poco tráfico en la red. Por tanto, se escoge un valor de temporizador alto, para que el sistema esté más tiempo en modo de bajo consumo. En caso contrario, si está por encima del umbral alto, se disminuye el temporizador para reducir cuanto antes el tamaño de la cola y reducir el retardo de los paquetes. Para calcular el valor del temporizador se tiene en cuenta también las características del tráfico hasta ese instante. Para ello, se calcula de manera continua una media móvil del tráfico.

Al final, el valor del temporizador tiene que llegar a un compromiso entre un menor consumo de energía (valores altos de temporizador, con lo que se minimiza el número de veces que se transmite), y un menor retardo en los paquetes (valores bajos del temporizador, pero que aumentan el número de veces que se transmite y por tanto el consumo).

- **Ensamble de ráfagas mejorado (*Enhanced Burst Assembly*)**

Nakkeeran *et al.* (2007) proponen un método adaptativo en el que se escoge el tamaño de la ráfaga en función a una predicción del tráfico basada en la observación de la variación de la tasa de llegada de paquetes. En este algoritmo se establece un tamaño mínimo de ráfaga ($\boldsymbol{B_{MIN}}$). Cuando se supera dicho tamaño mínimo, se escoge el tamaño de la ráfaga y el *offset* en el que se va a enviar la ráfaga. Si el tráfico es muy intenso y llegan más paquetes, estos se dejan para otra ráfaga. Para realizar el cálculo del tamaño de la ráfaga se propone un algoritmo de predicción. En primer lugar se mide la tasa media de llegada de paquetes de la ráfaga anterior. Se mide la tasa de llegada en la ráfaga actual hasta el momento en el que se supera el umbral de tamaño mínimo. A partir de estos dos valores se hace una media ponderada, y se usa este valor para estimar el número de paquetes que vendrán en un tiempo de *offset* fijo. La ventaja de este algoritmo es que permite saber con antelación el tamaño de la ráfaga, este aspecto es importante ya que para establecer el camino con el empleo del algoritmo JET, se requiere conocer de antemano la longitud de la ráfaga para reservarle los recursos.

- **Ensamblado adaptativo según el desbordamiento en los *buffers***

Propuesto por Düser *et al.* (2002) se define una estrategia de ensamblado que escoge dinámicamente el tiempo de ensamblado con el objetivo de lograr un determinado nivel de desbordamiento en el *buffer* de entrada a la red. Durante el proceso de formación de la ráfaga, se mide el tráfico medio y la varianza, que se introducen a un bucle de control donde se calcula, dado un determinado tamaño de *buffer* a la entrada de la red OBS, una estimación del nivel de desbordamiento en dicho *buffer*. Cuando el tráfico crece, el retardo en el *buffer* de entrada a la red aumenta, pero tras unas cuantas iteraciones en el bucle de control, el tiempo de ensamblado se modifica, de forma que el retardo vuelve a estar en los tiempos objetivos que se tenían previamente al incremento del tráfico. Cuando vuelva a decrecer el tráfico, el tiempo de ensamblado volverá a subir. La principal aportación de esta técnica de ensamblado es que se adapta a cualquier tipo de tráfico y consigue mantener el retardo controlado, de otro lado se requieren mayores pruebas para determinar su eficacia.

- **Algoritmo de ensamblado adaptativo con la ventana de TCP**

Los algoritmos anteriores solo tienen en cuenta el tráfico anterior en cuanto a número de datos o tasa de los mismos para poder realizar la estimación de qué temporizador es el más conveniente. Por su parte la tasa de transmisión de un flujo TCP (*Transmission Control Protocol*) depende del valor de la ventana de transmisión.

En Ramantas *et al.* (2008) se propone un algoritmo de ensamblado adaptativo en el cual se asignan distintos valores del temporizador de retransmisión a los flujos según la ventana de congestión del flujo TCP. De esta forma, si la ventana es pequeña, se sabe que el número de segmentos que quedan por transmitir es bajo, con lo que el valor del temporizador será asimismo bajo. En cambio, si la ventana es grande, se sabe que el flujo transmitirá más segmentos, con lo que el valor del temporizador se puede alargar para intentar transmitir el mayor número de segmentos de dicho flujo. Un aspecto a destacar con este método radica en la forma como se puede establecer la interdependencia entre las redes OBS y la suite de protocolos TCP/IP, especialmente el con el protocolos TCP de nivel 4, de esta forma sirve como insumo para el desarrollo del *Cross Layer* que se propone en el siguiente capítulo.

Finalmente cabe resaltar que el proceso de ensamble de las ráfagas disminuye el tráfico auto similar, que de otra forma podría afectar con pérdida de información si no se emplean memorias grandes y produce retardos de encolamiento en sistemas con almacenamientos grandes. Algunos autores definen que solo el algoritmo basado en el tiempo puede disminuir los efectos del tráfico auto similar. Sin embargo en Azodolmolky, Tzanakaki & Tomkos (2006) reportan en su estudio el impacto que tienen los mecanismos de ensamble de ráfagas sobre el tráfico auto similar y como no todos los mecanismos propuestos cumplen con la función de adaptarse al formato del tráfico IP.

- **Predicción del Tamaño de la ráfaga**

Cuando se emplea un algoritmo de ensamble de ráfaga basado en temporizador, el tiempo de finalización de la ráfaga es conocido, no así su tamaño, que sólo se conoce una vez vencido el temporizador. Poder conocer con anterioridad el tamaño de la ráfaga, permite adelantar la reserva del canal para su transmisión. Hashiguchi *et al.* (2003) proponen un método para estimar el tamaño de la ráfaga. La estrategia consiste en establecer un tiempo fijo desde el inicio de formación de la ráfaga durante el cual se realiza la estimación del tamaño de la ráfaga. Una vez hecha la predicción, se procede al envío del paquete de control. Y una vez se termine la formación o ensamble de la ráfaga, esta puede enviarse.

En el caso de que la predicción sea errónea, si la predicción es superior al tamaño real de la ráfaga, se desperdiciará la ocupación del canal, con lo que el rendimiento de la red OBS es menor. En caso de que la predicción sea inferior, se habrá reservado menos tamaño del necesario, con lo que se perderán parte de los paquetes de la ráfaga.

Nakkeeran *et al.* (2007) proponen no sólo estimar el tamaño, sino realizar una predicción para estimar el tamaño en un temporizador y fijarlo. De esta forma, si una vez que se tiene que enviar la ráfaga no se ha llegado al tamaño estimado, se desperdiciará igualmente la ocupación del canal. Sin embargo, nunca se superará el tamaño estimado, ya que si se llega a este tamaño, se empieza a crear una nueva ráfaga.

Hasta el momento se ha hecho una descripción de los mecanismos de ensamble de ráfagas propuestos por diferentes autores, cada uno de ellos presenta un aporte a tratar de responder a variaciones del tráfico de entrada y a la posibilidad de elegir los valores umbrales de tiempo de ensamble y longitud de la ráfaga. Al estudio en detalle de estos mecanismos se les ha dedicado gran parte de tiempo ya que constituyen uno de los elementos esenciales en el comportamiento de los nodos de borde, debido a esto, se han descrito con mayor detalle los mecanismos de ensamble tradicionales o más empleados en trabajos de investigación y los mecanismos predictivos que ayudan a definir los parámetros $\boldsymbol{B_{min}}$, $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{B_{max}}$ y $\boldsymbol{T}$ acordes con el tráfico que entra a la red específicamente a los nodos borde de ingreso y el tráfico total de la red, el objetivo es definir estos parámetros de forma dinámica y no estática como se propone en los documentos primarios donde se introduce OBS como un nuevo paradigma para transporte de información en redes ópticas (Qiao & Yoo 1999). Igualmente, dada su funcionalidad estos mecanismos de ensamble son susceptibles de ser mejorados al incluir elementos cognitivos.

Una vez revisados los aspectos relacionados con los algoritmos de ensamble de ráfagas, se procede al estudio de otro elemento de gran importancia dentro de las redes OBS, se trata de los algoritmos o mecanismos de señalización empleados en este tipo de redes, su importancia radica la incidencia que estos tienen en el desempeño de las redes OBS.

2.5. Algoritmos de Señalización

Aunque en el capítulo anterior se abordaron aspectos preliminares sobre los algoritmos de señalización, en el presente capítulo se hace una revisión con mayor detalle sobre los diferentes algoritmos de señalización con especial énfasis en el algoritmo **JET** basado en RFD el cual se ha elegido como modelo para la construcción de los escenarios de simulación en los capítulos siguientes. Se recomienda revisar la figura 1.26 del Capítulo 1 del presente documento, la cual consigna en un esquema la clasificación de modelos de señalización acorde con diferentes variables, este diagrama aunque genérico permite ubicar las diferentes técnicas empleadas en OBS.

2.5.1. El protocolo JET y Sus variantes

El protocolo JET (*Just Enough Time*) tiene dos características, reserva con retardo DR (*Delayed Reservation*) y la capacidad de integrar DR con el uso de *buffers* basados en multiplexores con el uso de FDL (*Fiber Delay Lines*) - BBMs (*Buffered Burst Multiplexers*). Estas características hacen que JET y sus variantes sean más adecuados para OBS cuando se compara con los protocolos basados en TAG (*Tell And Go*) y otros protocolos clase *one-way* para OBS.

La figura 2.17 ilustra el concepto de **JET**. Como se muestra, un nodo fuente **S** (*Source*) tiene una ráfaga a ser transmitida, primero se envía un paquete de control sobre un canal de señalización (que corresponde a una longitud de onda dedicada) hacia un nodo de destino **D** (*Destiny*).

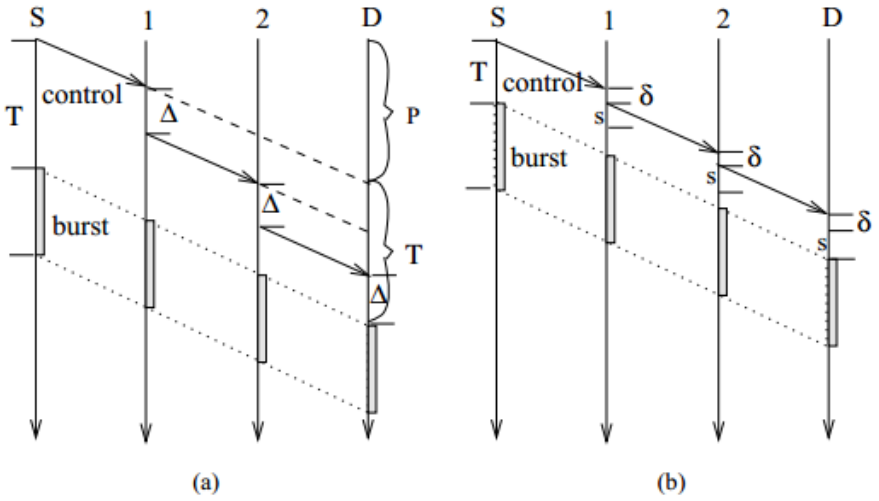


Figura 2.17. Protocolo JET usado en OBS

El paquete de control es procesado en cada nodo siguiente con el objetivo de establecer un trayecto de datos completamente óptico para la ráfaga. Es decir, con base en la información transportada en el paquete de control **BCP**, cada nodo selecciona una longitud de onda adecuada sobre el enlace de salida, reservando ancho de banda sobre el mismo y configurando el conmutador óptico. Mientras tanto, la ráfaga espera en el nodo fuente **S** en el dominio electrónico. Luego de un tiempo *offset* T, cuyo valor será determinado posteriormente, la ráfaga es enviada en una señal óptica sobre una longitud de onda seleccionada (por ejemplo a 2.5Gbos o 10Gbps).

2.5.2. El empleo del tiempo *offset*

Por simplicidad, se asume que el tiempo necesario para procesar el paquete de control (figura 2.17), reservar el ancho de banda apropiado y configurar el conmutador es Δ unidades de tiempo en cada nodo, omitiendo los tiempos de recepción y transmisión del paquete de control (pueden resultar despreciables). En un protocolo de control para OBS basado en TAG (o en conmutación de paquetes ya sea electrónica o óptica), una ráfaga es enviada por la fuente en conjunto con su paquete de control sin el uso de un tiempo *offset* (es decir haciendo T=0 en la figura 2.17). Además, en cada nodo siguiente la ráfaga debe esperar a que el paquete de control sea procesado y posteriormente ambos son enviados al siguiente nodo, igualmente sin definir un tiempo *offset*. De esta forma tanto el paquete de control como la ráfaga se retardan Δ unidades de tiempo, lo cual es denominado **latencia de control por nodo**. De acuerdo a esto, la latencia mínima de la ráfaga incluye el tiempo total de propagación, denotado como $\boldsymbol{P}$, aunque no se incluye el tiempo de transmisión, su valor será: $\boldsymbol{P} + \Delta * \boldsymbol{H}$ en este caso $\boldsymbol{H}$ (*Hops*) es el número de saltos a lo largo del trayecto (en la figura 2.17 H=3).

En JET, el tiempo *offset* se escoge como $T = \Delta * H$, como se observa en la figura 2.17 (a), para asegurar que existe el espacio suficiente para que el nodo procese el paquete de control antes que llegue la ráfaga. De esta forma, la ráfaga no tendrá una latencia mayor a la que tendría si hubiera empleado protocolos basados en TAG para OBS. De hecho, si se divide Δ en dos partes así: sea δ el tiempo para procesar el paquete de control e iniciar otras operaciones como por ejemplo la configuración de conmutador, y $s = (\Delta - \delta)$ el tiempo requerido para finalizar estas operaciones, se puede tener una mejor visión del proceso.

Con JET el paquete de control puede ser enviado hacia el próximo nodo una vez se ha consumido δ unidades de tiempo en cada nodo intermedio, o en otras palabras $\boldsymbol{s}$ unidades de tiempo antes de la ráfaga. Esto permite reducir el tiempo *offset* a $T' = \delta * H + s$, y la latencia a $P + T'$, la cual es $s * (H - 1)$ más pequeña que los protocolos OBS basados en TAG. Algunos autores ignoran la diferencia entre Δ y δ (y entre T y T') y simplemente lo consideran como un “retardo de procesamiento”.

Es importante resaltar que una ráfaga puede ser enviada sin tener que esperar un reconocimiento exitoso ACK (*Acknowledge*) desde el destino. Como ejemplo, una ráfaga a 2.5Gbps de tamaño 500KB (un promedio de 4000 paquetes IP) puede ser transmitida en cerca de 1.6ms. Sin embargo, un mensaje ACK tomaría 2.5ms en propagarse en una distancia de 500km. Esto puede explicar el por qué se prefieren protocolos en una vía a los de dos vías sobre distancia relativamente grandes (Jue & Vokkarane 2005), lo que puede favorecer el empleo de JET en una vía para redes WAN OBS.

2.5.3. DR (*Delayed Reservation*) para uso eficiente del ancho de banda

En la figura 2.18 a) se ilustra como DR o reserva con retardo de ancho de banda es útil para lograr un uso adecuado del ancho de banda, tanto JET como *Horizon* emplean DR (Teng & Rouskas 2003). Al usar TAG el ancho de banda del enlace de salida se reserva desde $\boldsymbol{t'1}$, el tiempo en que el nodo X termina de procesar el (primer) paquete de control. En JET se puede reservar el ancho de banda de la misma forma. Sin embargo, es normal retardar la reserva del ancho de banda un tiempo $\boldsymbol{t1}$, el tiempo de arribo de la (primera) ráfaga. Se tiene que $\boldsymbol{t1} > \boldsymbol{t'1}$ y su diferencia es el valor del tiempo *offset* entre la ráfaga y su correspondiente paquete de control en el nodo X.

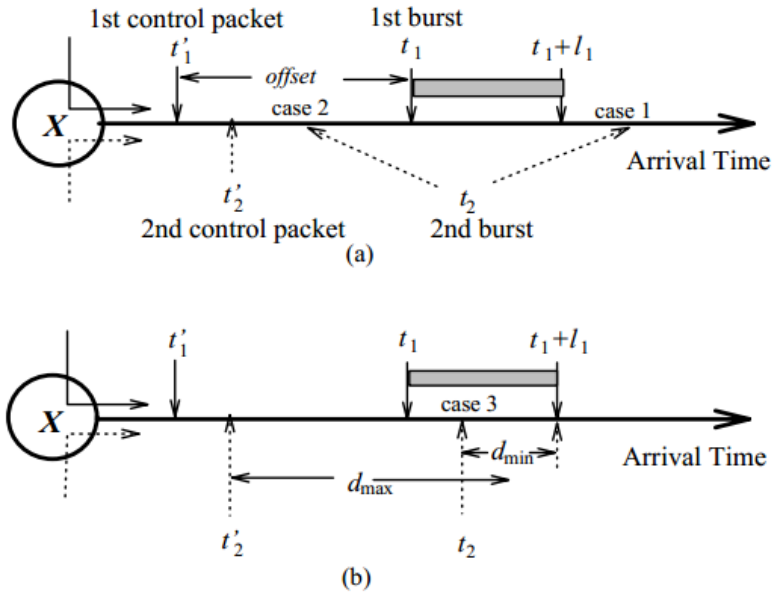


Figura 2.18. a) DR sin *buffer* y b) DR con *buffer* (Chen, Qiao & Yu 2004)

Una forma de determinar el tiempo de arribo de una ráfaga ($\boldsymbol{t1}$ por ejemplo), cuando el tiempo de procesamiento de un paquete de control varía de un nodo a otro, es dejar que el paquete de control pueda llevar el tiempo *offset* que va ser usado en el siguiente nodo. Este valor puede ser actualizado con base en el tiempo de procesamiento encontrado por el paquete de control en el nodo actual. En el ejemplo que se está considerando, una vez que el paquete de control ha realizado una reserva exitosa del ancho de banda, se programa su transmisión, es decir a un tiempo $\boldsymbol{t''1}$. El valor del tiempo *offset* a ser utilizado en el siguiente nodo se obtiene restando $\boldsymbol{t''1} - \boldsymbol{t'1}$ del valor actual. Igualmente, es posible que se necesite de bandas de guardas para controlar posible *jitter*, aunque este aspecto no siempre se tiene en cuenta.

Además teniendo en cuenta el tiempo de arribo de la ráfaga, t_1, siendo más importante que en JET, el ancho de banda puede ser reservado hasta t_1+l_1, donde l_1 es la duración de la ráfaga, en lugar de tomarlo hasta infinito. Este aspecto puede aumentar el uso del ancho de banda y reducir la probabilidad de perder una ráfaga. Para el caso mostrado en la figura 2.18 a) si se tiene que $t_2>t_1+l_1$ y $t_2<t_1$, respectivamente, la segunda ráfaga en el nodo X se puede perder si no se cuenta con almacenamiento para la ráfaga cuando se usa TAG. Sin embargo, cuando se usa JET, la segunda ráfaga no se pierde en ningún caso (caso 1 o caso 2) donde su longitud es más corta que $t_1 - t_2$.

Se evidencia como DR va de la mano con el uso del tiempo *offset*. Se asume igualmente, que la longitud de la ráfaga es conocida antes que el paquete de control sea enviado (este dato se obtiene una vez se ensambla la ráfaga). Si la longitud de la ráfaga es desconocida, el paquete de control se puede retrasar hasta que la ráfaga llegue en su totalidad o se haya alcanzado cierta longitud. En JET se puede enviar el paquete de control una vez se haga un estimativo del tamaño de la ráfaga. En el caso de sobre estimar la longitud de la ráfaga, se puede enviar otro paquete de control para liberar el exceso de recursos asignados. En caso contrario, se debe enviar el remanente de datos en una ráfaga adicional. JET puede soportar una sesión entera haciendo reserva del ancho de banda al infinito, en este caso emplea un paquete de liberación de recursos (cuando la sesión ha terminado).

2.5.4. Gestión Inteligente de *Buffer*

JET no hace control del uso del *buffer* ni su tamaño en términos del número de ráfagas o bits que se pueden almacenar (o retardar) simultáneamente, o el máximo retardo que se debe permitir a las ráfagas en cada nodo. En general, para implementar BBM se puede emplear FDL en la salida del enrutador o conmutador. Las FDL pueden ser dedicadas o distribuidas y con la tecnología actual, cada *buffer* tiene una longitud de unos pocos kilómetros con lo cual es posible obtener retardos del orden de los microsegundos (μS).

Debido principalmente al costo que implica un *buffer* óptico, JET hace efectivo el uso del *buffer* de dos formas. Primero, en JET, cada ráfaga espera (por ejemplo en un *buffer*) en el nodo fuente en el dominio electrónico durante el transcurso del tiempo *offset* de tal manera que no necesita almacenamiento en los nodos intermedios siempre que el paquete de control no sea bloqueado a lo largo del trayecto. Segundo, en el caso que el paquete de control sea bloqueado, se pueden integrar DR y BBM realizando una reserva inteligente del *buffer* disponible. Es decir una ráfaga se puede almacenar o retardar un tiempo específico, para el caso de la figura 2.18 b) el retardo puede ser $d_{min} = t_1 + l_1 – t_2$, por lo tanto la ráfaga no se perderá. En JET el nodo X puede determinar si hay un número suficiente de FDL necesarios para proveer retardos $\mathbf{d>d_{min}}$ empleando DR (lo que implica reservar FDL solo para el periodo de t_2 hasta t_2+l_2 en lugar de t'_2 hasta infinito); en otro caso no habrá reserva de FDL. Sin el uso de DR el nodo no puede saber cuánto retardo es necesario. Entonces se tiene que reservar la capacidad total de almacenamiento en BBM como se muestra en la figura 2.18 b). Es necesario tener en cuenta la relación de tiempos $t'_2 + d_{max} > t_1 + l_1$. O en caso peor se puede desperdiciar la capacidad entera de almacenamiento cuando d_{max} se torna insuficiente ($t'_2 + d_{max} < t_1 + l_1$) ya que la ráfaga debe ser descartada (Qiao & Yoo 1999).

2.5.5. Encaminamiento adaptativo y esquemas de prioridad

Un aspecto crítico de diseño en redes OBS es como reducir la probabilidad de pérdida o descarte de ráfagas. Con el uso incipiente o la carencia de almacenamiento, la probabilidad de perdida de ráfagas se puede mejorar implementando encaminamiento adaptativo y/o su asignación con alta prioridad.

Como se ha mencionado anteriormente, los protocolos para OBS basados en TAG no emplean un tiempo *offset*, en lugar de ello, una ráfaga de datos viaja a través de un FDL fijo en cada nodo intermedio de acuerdo con los parámetros de retardo del paquete de control. Esto facilita el uso de diferentes trayectos hacia un destino dado cada vez que una fuente envía una nueva ráfaga (o retransmite las ráfagas descartadas) ya sea empleando deflexión de ruta en un nodo intermedio cuando una ráfaga es bloqueada.

Estos protocolos también soportan enrutamiento multi-trayectoria desde una fuente dada a un destino cuando el número de saltos es conocido. Igualmente, en Qiao & Yoo (1999) se observa como los protocolos basados en JET pueden soportar adaptabilidad limitada aun sin el uso de FDL. Es decir desde la fuente se puede asumir un tiempo *offset* adicional para compensar la posible deflexión de ruta. Este aspecto puede servir para asignar alta prioridad a las ráfagas que tienen que viajar largas distancias (en términos de número de saltos).

En resumen, los esquemas de señalización en redes OBS se basan en los protocolos ya conocidos TAW y TAG. En TAW, el BCP es enviado primero y reserva todos los recursos necesarios a lo largo del trayecto hasta alcanzar el destino, si la reserva es exitosa el nodo de destino envía un mensaje ACK, en caso contrario el nodo donde se presenta el problema envía un NAK (o llamado ACK negativo por algunos autores) hacia el nodo fuente y libera los recursos que habían sido asignados hasta el momento. En el caso de TAG, el BCP se envía hacia el destino como en TAW solo que la fuente no necesita recibir ningún mensaje de acuse de recibo ACK desde el destino ya que después de un tiempo *offset*, se envía la ráfaga de datos, aun sin saber si el BCP haya alcanzado el destino. Si ocurre algún problema en la reserva, tanto el BCP como la ráfaga son descartados. En TAG existen dos variantes JIT y JET, en el primero la reserva de la longitud de onda sobre la cual debe arribar la ráfaga se reserva inmediatamente después que el BCP es procesado y se libera mediante un mensaje de control explícito. Aunque el BCP y la ráfaga de datos viajan en canales diferentes, el BCP solo informa al nodo central sobre la longitud de onda que fue programada para el arribo de la ráfaga. En el caso de JET, el ancho de banda se reserva solamente lo que dura la ráfaga de datos, cuando el BCP llega al nodo en su longitud de onda de control, lleva información sobre la longitud de la ráfaga, tiempo de arribo y la longitud de onda usada. Dicha

longitud de onda se planifica para la duración de la ráfaga solo después de cumplido el tiempo *offset*. Esto mejora el uso del ancho de banda, pero aumenta el tiempo de proceso del BCP en el nodo, lo anterior implica una mayor complejidad computacional en los nodos centrales.

Una vez revisados diferentes mecanismos de reserva de longitudes de onda en redes OBS, se puede concluir inicialmente que los esquemas JET y Horizon pueden tener una mejor aceptación desde diferentes perspectivas, aunque algunos autores como Teng & Rouskas (2003) sugieren inclinarse por JIT debido a su sencillez en la implementación. Se resalta que solo JET lleva información sobre el arribo de la ráfaga al nodo al igual que transporta información sobre la duración en tiempo de la reserva de ancho de banda requerida para la ráfaga.

En seguida se muestran algunos ejemplos sobre la evaluación de desempeño para lo cual se toman resultados obtenidos con un único nodo intermedio.

2.5.6. Ejemplo de evaluación del desempeño de JET

Para la evaluación del desempeño de JET y sus variantes, se asume que las ráfagas tienen una duración con distribución exponencial con un promedio notado como $\boldsymbol{L}$, y que el destino de cada ráfaga está distribuido uniformemente en todos los nodos excepto en la fuente. Para una ráfaga cuya distancia fuente a destino (o longitud del trayecto) es H (saltos), el mínimo *offset* es Δ*H. Se emplea k para denotar el número de canales (longitudes de onda) por enlace (algunos autores prefieren usar la letra W), b denota la relación del tiempo de *buffering* máximo (o B) hasta $\boldsymbol{L}$, y **c** para denotar la relación de Δ a L. Con estos elementos se hace un análisis que relaciona el retardo de ráfaga debido al bloqueo en el núcleo de red OBS con relación al empleo del enlace.

La figura 2.19 muestra una gráfica obtenida en Matlab™ de la comparación de JET con mecanismo DR y sin DR (NoDR) y para valores de b = {0,1}, para cada variante evaluada, en la medida que se aumenta el valor del retardo (D), aumenta la utilización del enlace, como es de esperarse, esto conduce a la pregunta formulada para el siguiente párrafo.

- **Qué tan efectivo es DR?**

En diferentes estudios se presentan los resultados de simulación para comparar el desempeño del protocolo JET (con DR) y se compara con una variante denominada sin DR (NoDR) aunque en ambas ocasiones se emplea el mismo *offset* (mínimo).

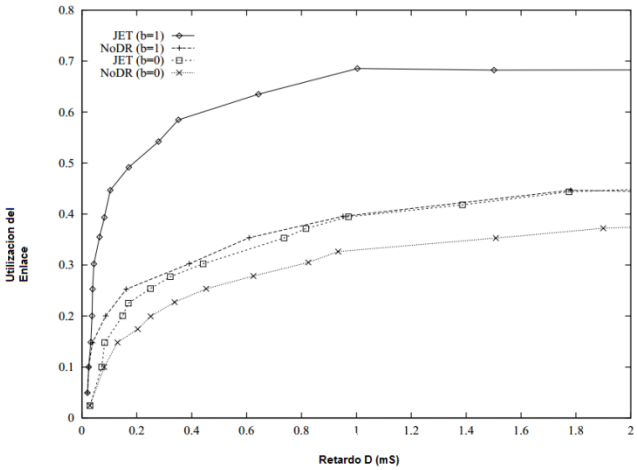


Figura 2.19. Resultados de la evaluación de desempeño para JET con y sin DR

Dolzer & Gauger (2001) y Christodoulopoulos *et al*. (2006) realizan estudios analíticos en detalle del desempeño de JET en redes OBS, mostrando el comportamiento de la red respecto a la probabilidad de perdida de ráfagas BLP (*Burst Loss Probability*) cuando se cuenta con diferentes clases de servicios. En este caso se muestra la conveniencia de emplear algoritmos con DR como JET.

Teng & Rouskas (2003) llevan a cabo un estudio comparativo entre JIT, JET y Horizon para ello propone un modelo analítico en el cual los tiempos se definen como sigue: t es el tiempo en llegar el mensaje de configuración a un nodo OBS a lo largo del trayecto hasta el nodo de destino, T_{offset} es el tiempo de retardo entre el BCP y el ráfaga de datos, T_{setup} es el tiempo de procesamiento del BCP y T_{oxc} es el tiempo de configuración del OXC en el nodo. Cuando se cumple que $t + T_{setup} + T_{oxc}$, el OXC está listo para transportar la ráfaga. Sin embargo, la ráfaga no llega hasta que se cumpla el tiempo $t + T_{offset}$, como resultado la longitud de onda asignada permanece desocupada un tiempo igual a ($T_{offset} - T_{setup} - T_{oxc}$). En el caso de JIT las longitudes de onda pueden estar en uno de dos estados reservadas o libres y con estos supuestos se realiza un análisis del proceso de asignación.

En el caso JET y Horizon, se crea un tiempo *void* o de espacio libre entre los tiempos $t + T_{set\ up}$ (cuando se completa la operación de reserva para la ráfaga entrante) y el tiempo $t' = t + T_{offset} - T_{oxc,}$ (cuando la longitud de onda de salida es realmente reservada para la ráfagas). En general, si k es el número de nodos en el trayecto de una ráfaga desde un nodo fuente a un nodo destino, se puede estimar el valor mínimo que puede tener el *offset* para garantizar que la ráfaga llegará al destino inmediatamente después que el mensaje de configuración haya sido procesado. La ecuación 2.1 muestra su valor, en este caso X representa el esquema de reserva. Por ejemplo, un valor de $T_{setup}\ (Horizon) = 25\mu s$, con un promedio de tamaño de ráfaga de $\frac{1}{\mu}$ (50ms) y una tasa de arribo de ráfaga (λ), tal que la relación $\frac{\lambda}{\mu} = 39$, son valores típicos en diferentes pruebas (Rodrigues, Freire & Lorenz 2004).

$$T_{MINoffset}\ (X) = k * T_{setup}\ (X) + T_{oxc} \qquad (2.1)$$

Luego para el caso de estudios de simulación realizados, el valor del *offset* puede tener diferentes distribuciones y la probabilidad de perdida de ráfagas puede medirse analíticamente a partir de la formula de Erlang B (ecuación 2.2), igualmente y dada la importancia del BCP y la información que transporta según el esquema de reserva de longitud de onda empleado, en la figura 2.20 se ilustra un formato propuesto para el BCP cuando se emplea JET y como resumen la tabla 2.2 muestra la comparación entre los diferentes esquemas de señalización revisados.

$$B(A,n) = \frac{(A^n/n!)}{\sum_{i=0}^{n} \frac{A^i}{i!}} \qquad (2.2)$$

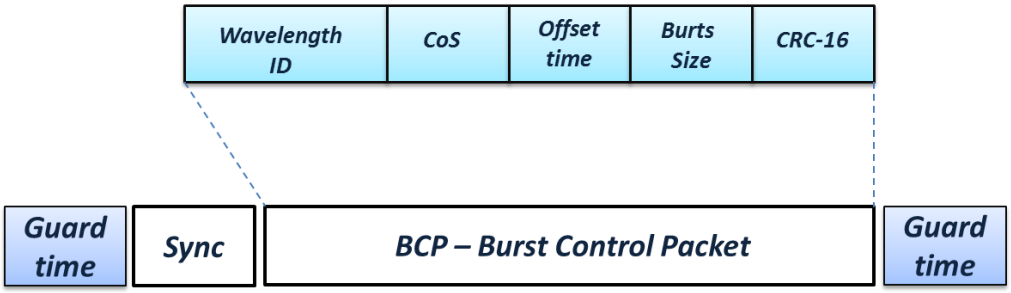


Figura 2.20. Formato BCP para un caso de estudio OBS

Igualmente, sobre los protocolos de reserva de longitud de onda, JET y *Horizon* se pueden incluir en las redes de prueba al momento de realizar los diferentes escenarios de simulación mostrados en los Capítulos 3 y 4.

Protocolo de Señalización	Dirección	Iniciación	Reservación	Liberación	Retardo	Pérdidas
TAW	*Two-way*	F./Dest.	Explicita	Explicita	Alto	Baja
TAG	*One-way*	Fuente	Implícita	Implícita	Medio	Alta
JET	*One-way*	Fuente	Implícita	Implícita	Bajo	Alta
JIT	*One-way*	Fuente	Explicita	Explicita	Bajo	Alta
INI	Híbrido	Intermedio	Exp./imp.	Exp./imp.	Flexible	Flexible

Tabla 2.2. Resumen de diferentes técnicas de señalización OBS

En seguida y a manera de resumen se listan las principales características de *Horizon*.

- *Horizon* es un esquema de reserva de recursos con retardo DR (*Delayed Reservation*).
- En su versión básica no realiza actividad de relleno de espacios VF (*void filling*).
- Típicamente menos compleja que los algoritmos que incluyen relleno de espacios VF.
- Cada longitud de onda se asocia con un tiempo horizon para realizar la reserva de ráfaga.
- El tiempo *horizon* se define como el tiempo en el cual no se ha planeado el uso de una longitud de onda.
- Este algoritmo es conocido también como algoritmo LAUC (*Latest Available Unscheduled Channel*).
- Es simple y fácil de gestionar.

La tabla 2.3 describe las ecuaciones de análisis para cada esquema de señalización, estas ecuaciones pueden ser empleadas para calcular variables de desempeño como BLP y retardos en general (salto a salto y extremo a extremo). La notación básica empleada es la siguiente:

- t_{bhp}: retardo de procesamiento del BHP en cada nodo de la red OBS.

Algunos autores asumen que el retardo para cada mensaje "*SET UP*", "RELEASE", y "CONMFIRM", en todos los nodos es el mismo.

- t_{sw}: tiempo de conmutación requerido para configurar el OXC en cada nodo.
- t_{agg}: retardo de agregación de ráfaga con bases en la técnica de ensamble adoptado en el nodo borde de ingreso en la red OBS.
- t_b: tiempo de transmisión de la ráfaga de datos.
- t_{ot}: tiempo offset, el tiempo inicial que se fija entre el BHP (fuera de banda) y la ráfaga de datos en el nodo borde de ingreso.
- t_p^{ij}: retardo de propagación sobre la fibra entre el nodo i y el nodo j.

Los valores típicos para t_p^{ij} es de 5µs/km, t_{bhp} es de cientos de nanosegundos (ns) y t_{sw} es de unos pocos µs.

En general primero se calcula el promedio del retardo extremo a extremo de los paquetes, (se supone un valor T_{SIG}), esto se hace para cada técnica de señalización. T_{SIG} es el tiempo que transcurre desde el momento que el primer paquete arriba al nodo borde de ingreso hasta el instante en que la ráfaga es completamente recibida en el destino (para n nodos).

Esquema de Señalización	Ecuaciones asociadas
JET (*Just Enough Time*) o JIT (*Just In Time*)	$T_{JET} = T_{JIT} = t_{agg} + t_{ot} + t_b + \sum_{l^{ij} \in R_{sd}}^{n} t_p^{ij}$ Donde, $t_{ot} = nt_{bhp} + t_{sw}$
TAG (*Tell And Go*)	$T_{TAG} = t_{agg} + nt_{fdl} + t_b + \sum_{l^{ij} \in R_{sd}}^{n} t_p^{ij}$ Donde, $t_{fdl} = t_{bhp} + t_{sw}$; FDL de compensación por nodo.
TAW (*Tell And Wait*)	$T_{TAW} = t_{agg} + t_b + t_{ot} + 3 \sum_{l^{ij} \in R_{sd}}^{n} t_p^{ij}$ También, $t_{ot} = 0 \; si \; 2 \sum_{l^{ij} \in R_{sd}}^{n} t_p^{ij} \geq (n+2) t_{bhp} + t_{sw}$
INI (*Intermediate Node*	Combinación de TAW y JET.

Initiated), Donde, l es el número de saltos entre fuente y el nodo intermedio IN, y m es el número de nodos entre IN y el nodo de destino.	$T_{INI} = t_{agg} + t_b + t_{ot} + 2\sum_{l^{ij} \in R_{sk}}^{n} t_p^{ij} + 3\sum_{l^{ij} \in R_{sd}}^{n} t_p^{ij}$ Donde, $t_{ot} = 0\ si\ 2\sum_{l^{ij} \in R_{sk}}^{n} t_p^{ij} \geq mt_{bhp} + t_{sw}$ O sino, $t_{ot} = \left(mt_{bhp} + t_{sw}\right) - 2\sum_{l^{ij} \in R_{sk}}^{n} t_p^{ij} \geq$ Si $l = n$, el tiempo de retardo es como en TAW, y si $l = 0$ o $m = n$, entonces el retardo es como en JET o JIT

Tabla 2.3. Ecuaciones para el cálculo analítico de JET y JIT y para nodos intermedios

Con estas ecuaciones y mediante el empleo de un escenario de prueba definido como se resume en la tabla 2.4, se obtienen gráficas que registran el comportamiento de la probabilidad de perdida de ráfagas BLP (*burst loss probability*) y retardos extremo a extremo (*end to end delay*), en general para la realización de escenarios de simulación se deben definir los diferentes componentes de la red (topología, numero de nodos, enlaces, numero de longitudes de onda por enlace, ancho de banda disponible) y las posibles restricciones o alcance del sistema a simular.

Parámetro	**Valores**
Red de Prueba	NSFNeT1 con 14 Nodos
Arribo de ráfagas	Distribución Poisson
Longitud de ráfaga	Distribución exponencial (promedio 0.1ms)
Velocidad de transmisión por enlace	10Gbps
Longitud de cada paquete	Fija de 1250 bytes
Tiempo de configuración de los conmutadores	0.01ms
Convertidores de longitud de onda	No
Almacenamiento en los nodos	Ninguno (No FDL)
Retransmisión de ráfagas perdidas	No se considera

Tabla 2.4. Parámetros típicos para escenarios de simulación OBS

Como se esperaba al observar la figura 2.21, y de acuerdo con diferentes resultados de análisis y simulación, se obtiene mejores resultados de desempeño del modelo de red OBS con JET que con otra técnica, esto refuerza el hecho de elegir JET como el modelo de señalización para el diseño de las pruebas en esta Tesis, estos resultados se basan en los estudios hechos por Jue & Vokkarane (2005).

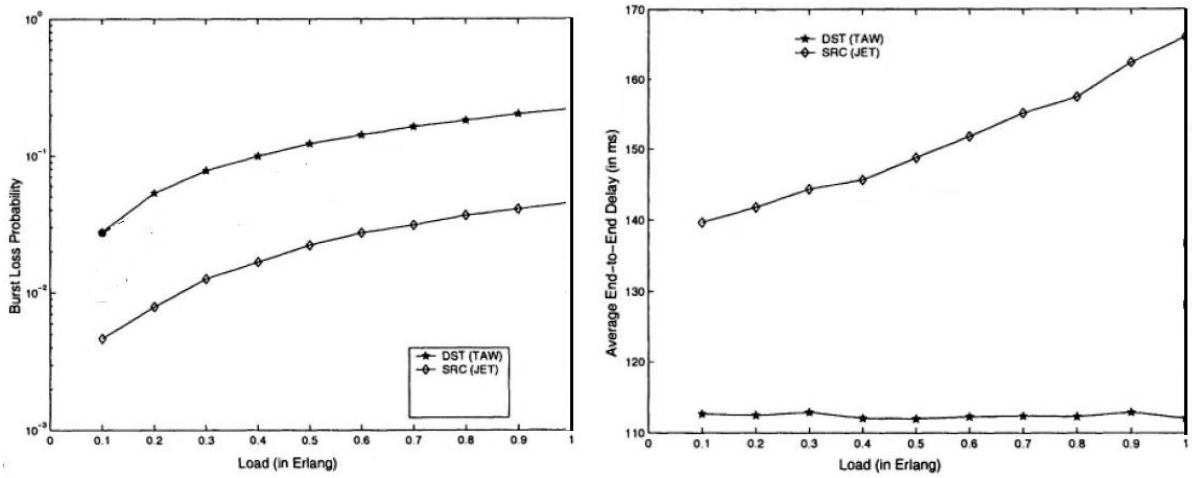


Figura 2.21. Resultados BLP y retardos (*Delay*) para el escenario propuesto con la red NSFNet

2.6. Calidad de servicio en redes OBS

2.6.1. Ambientación

Un aspecto muy importante en las redes es la posibilidad de ofrecer calidad de servicio QoS (*Quality of Service*) diferenciada. Cada tipo de aplicación y usuario tiene unos requisitos distintos, por lo que sus necesidades de transporte en la red son diferentes. Por ejemplo, mientras que descargando un correo no importa esperar unos segundos, unos cortes de flujo de información en un juego en tiempo real o una videoconferencia son molestos.

Por otro lado, un usuario pagando una cuota mensual baja puede tolerar degradaciones puntuales, pero un banco que paga una cuota elevada no puede permitir problemas, incluso puntuales, por ejemplo en comunicaciones con los cajeros automáticos o sistemas de compra. Más aun, las llamadas de emergencia han de tener prioridad sobre el resto del tráfico.

En las redes IP, el IETF ha propuesto dos modelos principales para soportar QoS, se trata de los mecanismo *IntServ*, definido en la RFC 1633 y *Diffserv*, definido en la RFC 2475, *IntServ* se basa en una reserva flujo a flujo, es decir mediante el empleo del protocolo RSVP (*Resource Reservation Protocol*) descrito en el RFC 2205, se puede reservar un camino con determinadas garantías de ancho de banda, retardo, perdida de paquetes, entre otros. Sin embargo esta aproximación tiene problemas de escalabilidad si se aplica en modelos a gran escala. Por otro lado, *DiffServ*, para poder conseguir una solución escalable, clasifica los paquetes de acuerdo a un código en el encabezamiento IP, según este código, los paquetes tendrán diferentes tratamientos en las colas de los enrutadores.

Para proveer QoS diferenciada, en las rede IP se define muchos esquemas de disciplinas de colas, entre ellas están encolamiento por prioridad PQ (*Priority Queuing*), encolamiento por un peso determinado WFQ (*Weighted Fair Queuing*), el esquema de selección dinámica de clases DCS (*Dynamic Class Selection*) este último provee QoS absoluto, en este caso los usuarios pueden buscar la clase apropiada para sus requerimientos absolutos.

De otro lado, a modo de generalización, los modelos para calidad de servicio se clasifican como QoS relativo y QoS absoluto, el primero no define el desempeño para cada clase en términos absolutos, por ejemplo, se dice que a una ráfaga de alta prioridad se le debe garantizar una baja probabilidad de perdida, al compararla con una ráfaga de baja prioridad. El modelo de QoS absoluto, provee garantía de QoS aun en el peor caso. Esta clase se emplea para garantizar soporte a aplicación con restricciones de retardos y ancho de banda, este modelo es preferido por los prestadores de servicio.

Igualmente, los modelos para QoS se pueden clasificar dependiendo del grado de aislamiento entre las diferentes clases de tráficos. En un modelo aislado, el desempeño del tráfico de alta prioridad es independiente del tráfico de baja prioridad, lo que no sucede en el modelo con bajo o ningún aislamiento (Chen, Qiao & Yu 2004).

2.6.2. QoS relativa en redes OBS

En las redes OBS se han propuesto diversos esquemas para soportar QoS relativa, entre estos esquemas están: señalización diferenciada, resolución de contención diferenciada, ensamble de ráfagas diferenciado, o planeación diferenciada. La señalización diferenciada puede implementarse con JET y TAW para tráfico en ráfagas y trafico CBR respectivamente, JET es un tipo de señalización sin conexión, mientras que TAW es un tipo de señalización con conexión u orientado a conexión, la selección del tipo de señalización se puede hacer con base en parámetros estáticos como requisitos de QoS y distancia entre saltos, o mediante parámetros dinámicos como las condiciones actuales de tráfico en la red.

En la selección estática, el problema es asignar un método específico de señalización para cada tipo de ráfaga de tal manera que pueda satisfacer los requerimientos de QoS de los paquetes contenidos en la ráfaga. En la aproximación dinámica el método se selecciona en línea dependiendo del estado dinámico de la red o de la composición dinámica de la ráfaga. Por ejemplo, si la red tiene una carga de tráfico baja, el método de señalización sin conexión provee bajos retardos mientras la pérdida de paquetes es moderada. En caso de alto tráfico en la red el método sin conexión puede llevar a la perdida de muchos paquetes, entonces se debiera emplear el método orientado a la conexión.

2.6.3. QoS en la asignación del tiempo *offset*

Se ha demostrado como ráfagas de alta prioridad experimentan menos contención y menos pérdidas que ráfagas de baja prioridad. En el primer caso se da un tiempo extra para las ráfagas de alta prioridad lo que les asegura un tiempo suficiente para una reserva de recursos exitosa. Como ejemplo se puede ilustrar el caso en el cual se tienen dos clases de ráfagas, clase de alta prioridad y clase de baja prioridad. Sean t_a^h y t_a^l los tiempos de arribo de los BCP para ráfagas de alta y baja prioridad respectivamente.

A las ráfagas de baja prioridad se les asigna un tiempo T *offset* mientras que a las de alta prioridad se les asigna un tiempo $T + t_{add}$ (t_{add} tiempo adicional), las longitudes de las ráfagas de alta prioridad y baja prioridad son respectivamente L_h y L_l. Si el

BCP de las ráfagas de alta prioridad llegan antes que el BCP de las ráfagas de baja prioridad ($t_a^h \leq t_a^l$) entonces la ráfaga de alta prioridad será planificada siempre de forma exitosa, en el caso contrario ($t_a^h > t_a^l$) la ráfaga de alta prioridad puede ser planificada si el tiempo de arranque de dicha ráfaga esta después del tiempo de fin de la ráfaga de baja prioridad entonces, $t_a^h + T + t_{add} > t_a^l + T + L_l$, así, para que la ráfaga de alta prioridad sea planificada, el tiempo *offset* adicional debe ser al menos $L_l + (t_a^h - t_a^l)$. Se ha demostrado que bajo ciertas condiciones, se requiere un tiempo *offset* adicional de cinco (5) veces la longitud máxima de ráfaga para lograr un aislamiento de clases del 99%. Estas condiciones garantizan una BLP aceptable y baja, pero aumenta considerablemente el retardo extremo a extremo.

2.6.4. QoS mediante resolución de contención priorizada

En este caso las ráfagas se presentan con diferentes prioridades, la resolución de contención se hace considerando dichas prioridades, entonces se pueden emplear las técnicas para resolución de contención por segmentación selectiva, deflexión de ruta, y eliminación de ráfagas.

Entre las políticas a seguir están:

- SFDP (*Segment First and Deflect Policy*) en este caso al segmentar la ráfaga los segmentos de la cola de la ráfaga se envían por otro puerto y en caso de falla se eliminan;
- DFDP (*Deflect First and Drop Policy*) la ráfaga en contienda se envía por otro puerto, de no haber disponibilidad se eliminan;
- DFSDP (*Deflect First, Segment and Drop Policy*) en este caso la ráfaga en contienda se envía hacia un puerto alterno, en caso de no haber puertos disponibles, la ráfaga original se segmenta y los segmentos de la cola se eliminan, mientras la ráfaga en contienda es enviada completa;
- SDP (*Segment and Drop Policy*) la ráfaga contendiente gana la contención y la ráfaga original es segmentada mientras sus segmentos de cola se pierden;
- DP (*Drop Policy*) la ráfaga original gana la contención y la ráfaga contendiente se elimina completamente.

La figura 2.22 muestra los posibles escenarios de resolución de contención con base en las prioridades asignadas.

Por su parte, la tabla 2.5 muestra los diferentes esquemas y políticas para brindar QoS según contención priorizada (Po y Pc son las prioridades a las ráfagas original y de contienda), Lo y Lc se refieren a las longitudes de las ráfagas original y de contención.

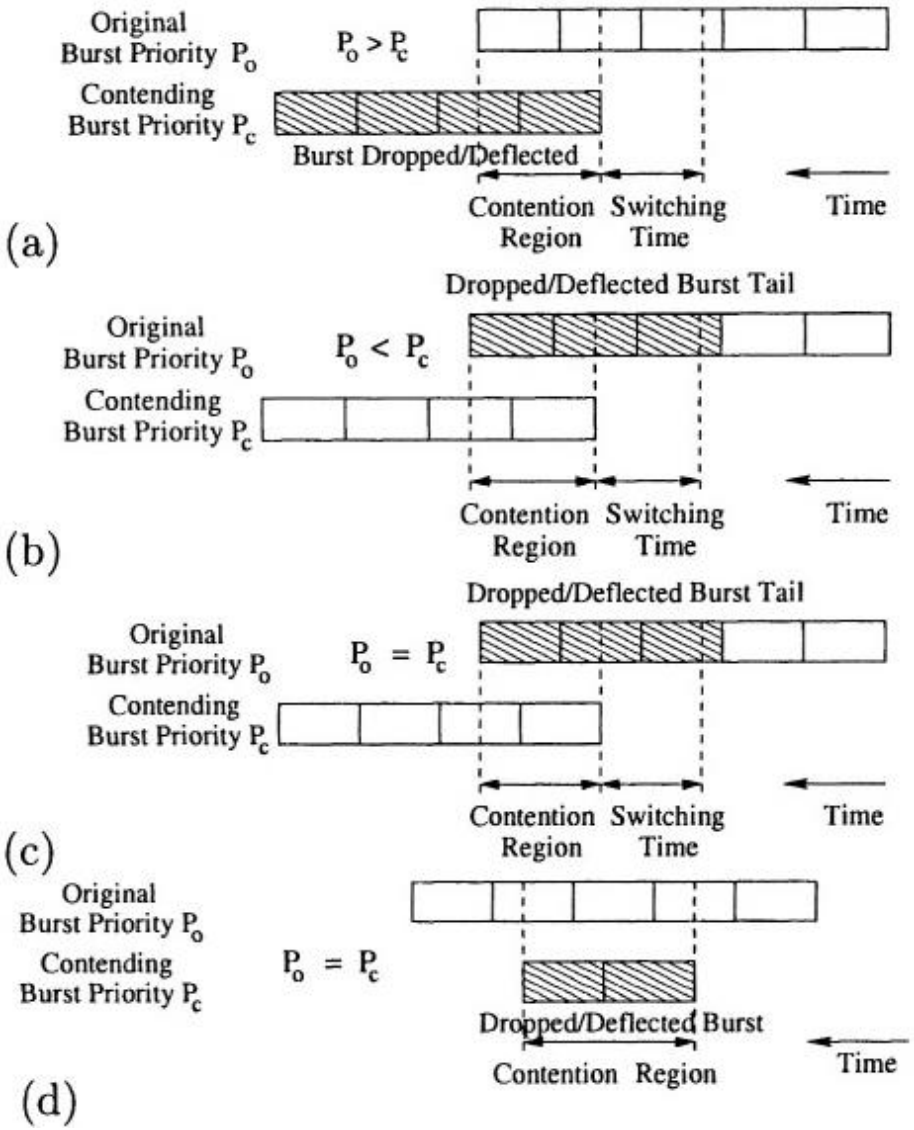


Figura 2.22. a) contención de ráfaga de baja prioridad con ráfaga de alta prioridad. b) contención de ráfaga de alta prioridad con ráfaga de baja prioridad. c) contención entre ráfagas de igual prioridad con ráfagas largas. d) contención entre ráfagas de igual prioridad con ráfagas cortas (Chaing *et al.* 2007)

Escenario de contención	Relación de prioridad de ráfaga	Relación de longitud de ráfaga	Esquema de políticas (1)	Esquema de políticas (2)
1	$Po > Pc$	Cualquiera	DFDP	DFDP
2	$Po < Pc$	Cualquiera	SFDP	SFDP
3	$Po = Pc$	$Lo > Lc$	DFDP	DFDP
4	$Po = Pc$	$Lo < Lc$	DFSDP	SFDP

Tabla 2.5. Políticas de QoS para varios escenarios de contención

En resumen, los mecanismos de QoS tratan de ofrecer a las aplicaciones y usuarios un comportamiento del tráfico acorde a sus necesidades y expectativas, en lugar de tratar a todos los datos por igual. Por tanto, una red OBS también ha de ser capaz de implementar mecanismos de QoS, y poder ofrecer tratamientos diferentes a los paquetes que entran en la red y son transportados a través de ella (Jue & Vokkarane 2005).

2.6.5. QoS proporcional con eliminación temprana (*early dropping*)

Si pi es la métrica de pérdida y si es el factor de diferenciación para cada clase i, entonces, usando un modelo de diferenciación proporcional se debe cumplir la siguiente proporción (ecuación 2.3) para cada clase.

$$\frac{pi}{pj} = \frac{si}{sj} \qquad (2.3)$$

Para mantener este modelo, cada nodo debe mantener estadísticas de tráfico, tales como el número de ráfagas que llegan y el número de ráfagas perdidas por cada clase. En este caso la probabilidad de pérdida de ráfagas por clase i, pi es la relación entre el número de ráfagas de clase i que se pierden respecto al número de ráfagas clase i que arriban al nodo durante un intervalo de tiempo fijo. Como desventaja de este método se menciona la perdida innecesaria de ráfagas de baja prioridad. Sin embargo es un modelo que puede tener utilidad para controlar el estado real de un nodo en un momento determinado respecto al número de ráfagas perdidas por clase, esta métrica puede ayudar a evaluar el desempeño de una red OBS.

2.6.6. QoS mediante Colas priorizadas

Este esquema incorpora el algoritmo de planificación LAUC-VF en los nodos de núcleo de la red. En la medida que se asignan canales a las ráfagas que llegan con base en una cola de prioridades, las ráfagas de alta prioridad son planificadas antes de las ráfagas de baja prioridad. Resultados de simulación muestran que se mejora la BLP para ráfagas de alta prioridad, pero empeora para las de baja prioridad.

2.6.7. QoS basado en reserva

Loi, Liao & Yang (2002) proponen un esquema de diferenciación manteniendo ocupadas el número de longitudes de onda para cada clase de ráfagas. Cada ráfaga que arriba si cumple con los perfiles de uso definidos en cada nodo desplaza a otra ráfaga que no cumpla con dicho perfil (*preemption*).

2.6.8. QoS con base en mecanismos de ensamble de ráfagas

Diferenciación de servicios se puede proveer mediante el empleo de diferentes métodos de ensamble de ráfagas. En el esquema de planificación propuesto en Chen, Hamdi & Tsang (2001) y definido como prioridad por tiempo de espera WTP (*Waited Time Priority*) se extiende al método de ensamble de ráfagas con base en longitud fija de ráfaga para garantizar diferenciación de retardo flexible. Cada ráfaga consta de paquetes de la misma clase de esta manera se puede calcular la BLP para cada clase de servicio, las ráfagas de baja prioridad se descartan intencionalmente con el objetivo de dar más tiempo de las ráfagas de alta prioridad. En (Xiong, Vanderhoute & Cankaya 2000) los paquetes son clasificados de acuerdo con su clase y dirección de destino.

Cada ráfaga consta de una clase de paquetes que tiene un respectivo *timeout* y un valor umbral de longitud de ráfaga. Cuando el *timeout* o el umbral se alcanza la ráfaga es creada y enviada hacia la red OBS. En el caso de presentarse arribo de paquetes con baja velocidad, no se alcanza el umbral de ráfaga y al vencerse el *timeout*, las ráfagas pueden tener pocos paquetes. Como ya se ha anotado con anticipación en el capítulo previo, cuando esto se presenta, si se cuenta con un esquema centralizado o distribuido, el número de paquetes de control o de solicitud

de conexión se incrementan con lo cual se tiende a saturar el plano de control. Igualmente, cuando las ráfagas son grandes, los retardos experimentados por los paquetes tienden a ser altos, lo cual se tiende a formar conflicto con las restricciones de tiempo de las clases de paquetes. Según Xiong, Vanderhoute & Cankaya (2000) se calculan los valores mínimos para evitar congestión en el plano de control. Se propone el ensamble de paquetes de diferentes clases para reducir el número de paquetes de control con lo que se reduce el tiempo de procesamiento del BHP, aumentando la velocidad de transmisión.

En el ensamble de ráfagas basado en direccionamiento, se puede considerar el caso de una única clase, en la cual solo existe una única clase de paquetes con unos requerimientos de QoS específicos, y el caso de múltiples clases en las cuales hay paquetes de distintas clases, cada paquete con diferentes requisitos de QoS. Para el caso de una sola clase, el objetivo es seleccionar los valores apropiados para el *timeout* (o *timer*) ya sea para evitar retardos altos de paquete o minimizar la perdida de paquetes en el *core*. Para este último caso se introducen los conceptos de ensamble de ráfaga diferenciado y ensamble de ráfaga compuesto.

En el ensamble de ráfagas diferenciado, se pueden emplear diferentes políticas de ensamble, las ráfagas compuestas de paquetes cuyos paquetes tengan altos requisitos de tiempo se pueden ensamblar mediante empleando el algoritmo basado en tiempo, mientras que otros paquetes pueden ser ensamblados empleando el mecanismo del umbral de longitud de ráfaga.

En el esquema compuesto para el ensamble de ráfagas, paquetes de diferentes clases se pueden agregar dentro de la misma ráfaga, esto puede ayudar al momento de presentarse contención en el núcleo de la red OBS.

El problema del ensamble de ráfagas generalizado se define y formula en seguida. Sea N el número de clases de los paquetes entrantes y M el número de prioridades de ráfagas soportadas en el núcleo de la red. Puede ser que la clase del paquete no necesariamente tiene una correspondencia uno a uno con la prioridad de las ráfagas. Se define un conjunto de tipos de ráfagas, las cuales especifican las políticas de ensamble de ráfagas. Sea K el número de tipos de ráfagas. Entonces cada tipo de ráfaga se caracteriza por los siguientes parámetros:

L_k^{MIN}: Longitud mínima de ráfaga de tipo k.
L_k^{MIN}: Longitud máxima de ráfaga de tipo k.
R_{jk}^{MIN}: Número mínimo de paquetes de clase j en una ráfaga de tipo k.
R_{jk}^{MAX}: Numero máximo de paquetes de clase j en una ráfaga de tipo k.
$S_k = \{j \mid R_{jk}^{MAX} > 0\}$: Es el conjunto de clases de paquetes los cuales pueden ser incluidos en una ráfaga de tipo k. Cuando una ráfaga de tipo k es creada, todos los paquetes de clase $j \in Sk$ será incluido en una ráfaga, este aspecto puede estar sujeto a las restricciones especificadas por $L_k^{MIN}, L_k^{MAX}, R_{jk}^{MIN}\ y\ R_{jk}^{MAX}$.
P_k: Prioridad asignada a una ráfaga de tipo k. Se nota como los diferentes tipos de ráfagas pueden tener la misma prioridad en núcleo óptico.
τ_k: Es el valor del *timer* para crear una ráfaga de tipo k, cuando un paquete de clase $j \in Sk$ arriba al nodo, se empieza a correr un temporizador. Cuando el *timer* alcanza el valor τ_k, se crea una ráfaga de tipo k. Si no se especifica el este valor de *timer*, entonces la ráfaga se crea empleando el umbral.
T_k: Valor de umbral para crear ráfagas de tipo k. Si xj es el número de paquetes de clase j acumulados en un nodo, entonces una ráfaga de tipo k es creada si $\sum_{j \in Sk} x_j \geq T_k$.

Dados *N, M* y los requisitos de QoS para cada clase de paquetes, el problema de ensamblar la ráfaga se convierte en seleccionar el valor K, para cada tipo de ráfaga $k = 0,2,\ldots,K-1$, específicamente los parámetros $L_k^{MIN}, L_k^{MAX}, R_{jk}^{MIN}\ y\ R_{jk}^{MAX}, P_k, \tau_k\ y\ T_k$ tal que los requisitos de QoS sean satisfechos.

Las importantes consideraciones de diseño cuando definen los tipos de ráfagas con BLP, restricciones de retardo, y requisitos de ancho de banda. BLP en el núcleo de la red es función de varios parámetros, tales como tamaño de ráfaga, prioridad de ráfaga, número de ráfagas generadas, y esquemas de resolución de contención en el núcleo. La probabilidad de perdida de paquetes puede ser afectados por ajustando el umbral Tk, la ráfaga de tamaño L_k^{MAX}, y la prioridad de ráfaga Pk. Las restricciones de retardo extremo a extremo se pueden alcanzar fijando adecuadamente los valores del *timer* para cada tipo de ráfaga τ_k, los requerimientos de ancho de banda para una clase de paquetes dado se pueden alcanzar asegurando que un adecuado número de paquetes de una clase dada son insertadas en una ráfaga generada, y que las ráfagas son generadas a una velocidad suficiente para proveer el ancho de banda

requerido. Así, la cantidad de ancho de banda para cada clase dada de paquetes puede ser determinado por los factores R_{jk}^{MIN} y R_{jk}^{MAX}, τ_k y T_k.

Diferentes experimentos para cuatro clases y dos prioridades en una red OBS y sin ráfagas compuestas fueron realizados en Vokkarane *et al.* (2002). Los paquetes de clase 0 se asume que tienen restricciones de retardo, mientras otras clases de paquetes se asume que tienen restricciones de perdida de paquetes relativa con respecto a otras clases de paquetes, (por ejemplo, la perdida de paquetes de clase 1 puede ser menor que las pérdidas de los paquetes de clase 2,..), las relaciones de tráfico pueden ser asumidos como 10%, 20%, 30%, y 40% para clases 0,1, 2 y 3 respectivamente.

Para el caso de ráfagas no compuestas, se definen cuatro tipos de ráfagas, una para cada clase de paquete ($S_k = \{k\}$). Todas los tipos de ráfagas tienen el mismo valor de umbral $T_k = 100$ paquetes, mientras el tipo de ráfaga correspondiente a paquetes de clase 0 se le asigna un valor de *timer* de $\tau_0 = 50ms$. Ya que se tienen cuatro tipos de ráfagas pero solo dos niveles de prioridad, algunas ráfagas comparten la misma prioridad. Para las ráfagas de prioridad 0 y 1 se les asigna la prioridad de ráfaga 0 ($Po = P1 = 0$), mientras que las ráfagas correspondientes a paquetes de clases 0 y 1 se les asigna prioridad 1 ($P2 = P3 = 1$). El procedimiento de ensamble se muestra en la figura 2.23.

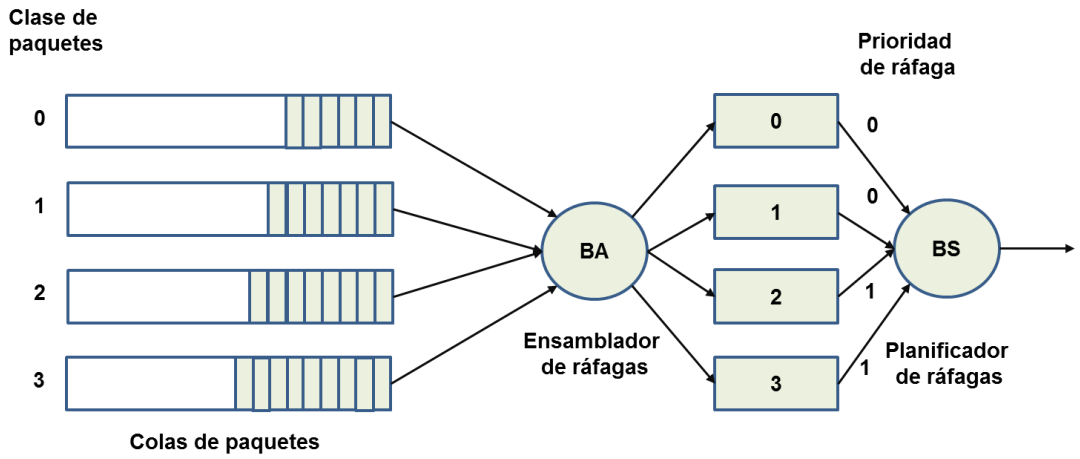


Figura 2.23. Única clase por ráfaga

Para el caso de ráfagas compuestas, se pueden definir dos tipos de ráfagas, las ráfagas tipo 0 manejan paquetes de clase 0 y clase 1 ($S0 = \{0,1\}$), mientras las ráfagas tipo 1 manejan paquetes clase 2 y clase 3 ($S1 = \{2,3\}$). Ambos tipos de ráfagas tienen el mismo valor de umbral ($T_0 = T_1 = 100\, paquetes$), mientras a las ráfagas tipo 0 se les asigna un valor de *timer* de $\tau_0 = 50ms$. A las ráfagas de tipo 0 se le asigna un prioridad de P0 = 0 y a las de tipo se les asigna una prioridad de P1 = 1. El procedimiento para este caso se muestra en la figura 2.24. No se dan restricciones sobre los valores máximo y mínimo del número de paquetes de cada clase en una ráfaga dada o sobre el número máximo y mínimo de paquetes de una ráfaga en general.

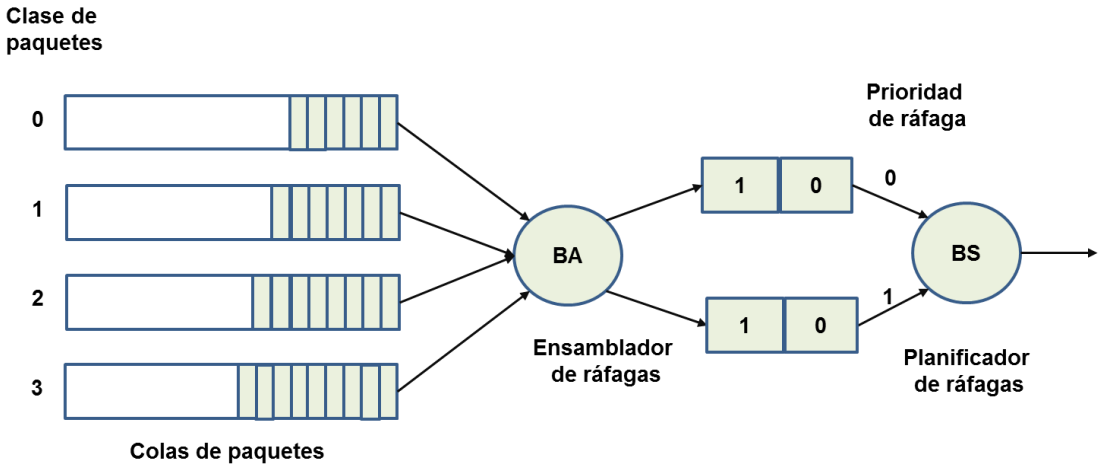


Figura 2.24. Ráfagas compuestas por varias clases

En la figura 2.25 se observa el comportamiento del sistema respecto a la medida de BLP y el retardo extremo a extremo en la medida que la carga de tráfico se incrementa, esto para valores de longitud o umbral de ráfaga de 100 paquetes y un tiempo de formación de ráfaga de 50ms, como es de esperarse, en general BLP aumenta para todos los esquemas cuanto mayor es la carga aplicada y el retardo promedio tiende a disminuir con el aumento de la carga de tráfico, se observa un mejor comportamiento para los esquemas con primeras clases.

2.6.9. QoS en redes WROBS (*Wavelength Routed OBS*)

En González *et al.* (2000), de Miguel, Düser & Bayvel (2001), Duser, de Miguel & Bayvel (2002) se proponen diferentes aproximaciones para el caso de redes WROBS

o redes OBS centralizadas, en estas redes cada nodo envía un requerimiento de conexión a un nodo centralizado o planificador de requisitos. Debido a su funcionalidad esta clase de redes emplean esquemas con conexión CO (*Connection Oriented*), al contrario de las redes OBS que son sin conexión CL (*Connectionless*). Para complementar algunos aspectos generales sobre estas arquitecturas centralizadas y al final de capitulo se hace una semblanza sobre WROBS.

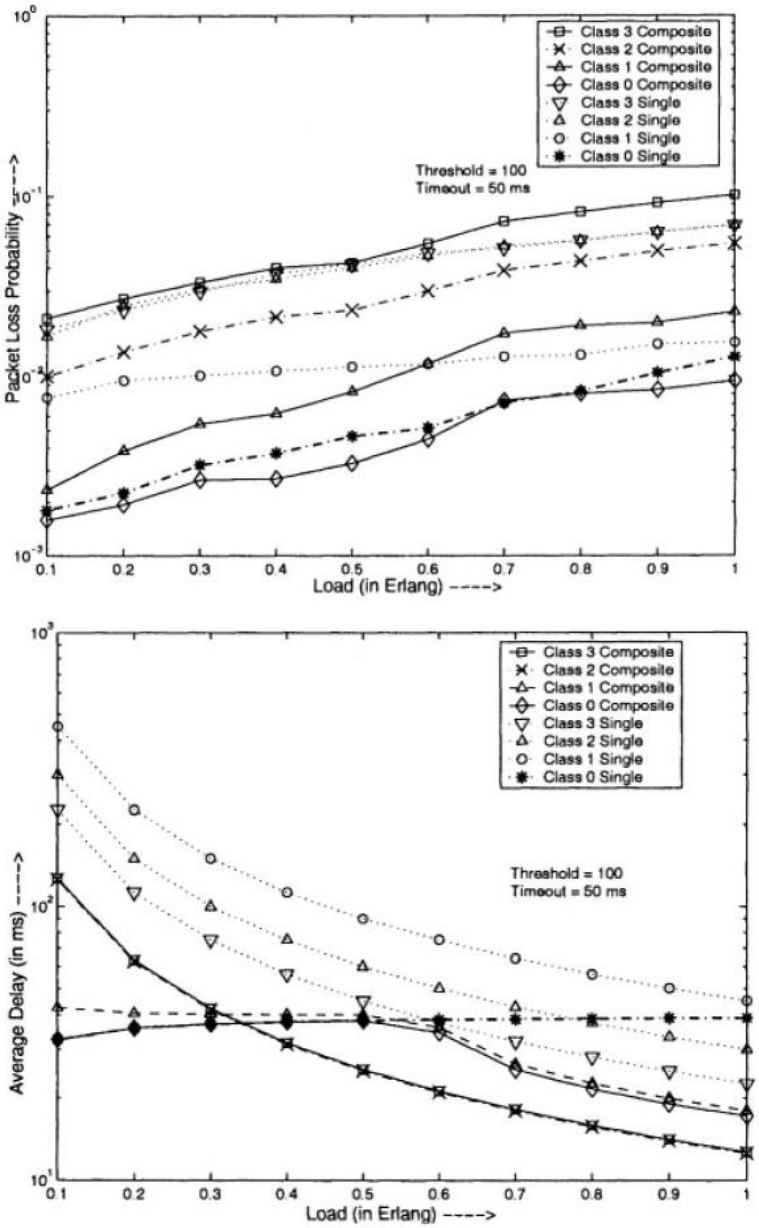


Figura 2.25. Gráficas de BLP y retardo promedio (*Average Delay*) versus carga de tráfico normalizada

En lo relacionado con Calidad de Servicio, los nodos de borde al tráfico de alto nivel se le asignan diferentes clases de servicio CoS (*Class of Service*) basados en el máximo retardo aceptable y la dirección de destino de los paquetes. Además cada nodo de borde tiene $C(N-1)$ *buffers*, donde C es el número de clases y $(N-1)$ es el número de posibles nodos de destino.

En el nodo central (planificador de requisitos), los requerimientos de conexión son ordenados con base en la clase de servicio en un total de C colas priorizadas. Los requerimientos de alta prioridad son atendidos antes de los de baja prioridad, ya que el nodo central debe gestionar los requerimientos de conexión para la totalidad de la red OBS, el grado de complejidad de esta aproximación es significativa. Un aspecto a tener en cuenta es lo relacionado con el tamaño de esta clase de redes ya que esto podría aumentar el número de peticiones de recursos desde los distintos nodos lo que puede causar bloqueo en el servidor de requerimientos, sin embargo es posible buscar mecanismos cognitivos para controlar la atención a las mismas y evitar episodios de congestión que pueden presentarse en la operación de la red WROBS debido a su baja escalabilidad.

2.6.10. QoS Absoluta

Los esquemas de diferenciación de QoS relativos por lo general no garantizan el soporte de las métricas de QoS lo cual conlleva a contar con esquemas de diferenciación absolutas (Chlamtac, Ganz, & Karmi 1992). En este caso de prestar servicio de transporte de información con calidad de servicio absoluta se propone un esquema hibrido en el cual los datos que son garantizados deben enviarse por una red WR *lightpaths* y la red clásica OBS para transportar tráfico no garantizado. Entre las opciones que permiten emplear mejor las longitudes de onda se encuentran: QoS probabilístico (con *preemption*) descrito con mayor detalle en Yang, Jiang &Jiang (2003) y en Cankaya, Charcranoon & El-Bawab (2003).

Finalmente, otras alternativas para proveer QoS en redes OBS (Jue & Vokkarane 2005, pp. 121- 129) se listan en seguida:

- Descarte temprano o ED (*Early Dropping*), para ráfagas que transportan paquetes de clase baja.

- Agrupación de longitudes de onda WG (*Wavelength Grouping*)
- Ventana de Resolución de Contención.
- Reserva de recursos con base en Filtros lineales predictivos.
- QoS basada en calidad de señal de las señales físicas.
- Integración de mecanismos.

En la Tabla 2.6 se muestra un resumen de los mecanismos propuestos que más se referencian en la literatura para ofrecer QoS en OBS.

Mecanismo
Incremento de *offset*
Ensamblado diferenciado
Clonado de ráfagas
Encaminamiento diferenciado
Asignación de longitud de onda diferenciado

Tabla 2.6. Resumen de Técnicas de QoS en OBS

2.7. Encaminamiento en redes OBS

El encaminamiento o enrutamiento en las redes OBS es el proceso por el cual se decide el conjunto de enlaces y nodos que empleará una ráfaga de datos para ir desde el nodo origen al nodo destino. Por lo tanto, el encaminamiento está estrechamente ligado al proceso de reserva del camino (de hecho, puede considerarse una parte clave del mismo). Dentro del proceso de encaminamiento hay dos tareas claramente diferenciadas. Una de ellas es el proceso de obtención de la información topológica y de ingeniería de tráfico (por ejemplo, ocupación de los enlaces), y otra es el proceso por el cual, una vez conocido el estado de la red, se obtiene la ruta del camino óptico.

Obtener la información sobre la topología de la red puede realizarse mediante el empleo de protocolos tipo IGP (*Interior Gateway Protocol*), como por ejemplo el protocolo RIP (*Routing Information Protocol*) (Malkin 1998), OSPF (*Open Shortest Path First*) (Moy 1998) o IS-IS (*Intermediate System-Intermediate System*) (Oran 1990). Si además de la información puramente topológica se requiere emplear en el

proceso de encaminamiento información de ingeniería de tráfico, por ejemplo el grado de ocupación de los enlaces, pueden emplearse las extensiones de ingeniería de tráfico, como por ejemplo OSPF-TE (*OSPF Traffic Engineering*) (Katz, Kompella & Yeung 2003). Mediante este protocolo, fuera de banda, cada nodo de la red disemina mediante inundación la información relativa a qué nodos son sus vecinos, qué enlaces parten de los nodos y su ocupación.

Si además de la información topológica, se quieren incluir información sobre ingeniería de tráfico en la red OBS, es necesario realizar extensiones específicas para tener en cuenta las particularidades de OBS, es el caso del trabajo realizado por la IETF con las extensiones a OSPF para el soporte al encaminamiento y asignación de longitud de onda redes de conmutación de circuitos ópticos WSON (*Wavelength Switched Optical Networks*) como se estudia en (Zhang *et al.* 2010). Sin embargo, en el caso de una WROBS en las que las peticiones de longitud de onda llegan en intervalos de tiempo muy cortos, el empleo de un protocolo como OSPF-TE puede tornarse inviable debido al tiempo de actualización de información inherente a dicho protocolo. En ese caso, se propone que el elemento encargado de realizar el cálculo de la ruta asuma de manera temporal que el camino que ha calculado se establecerá con éxito, por lo que para la siguiente ráfaga no se le dará en ningún caso el mismo recurso.

En cuanto al cálculo de la ruta (y en el caso de WR-OBS de la longitud de onda), si se atiende a un criterio de dónde se realiza el proceso de encaminamiento, se puede distinguir entre encaminamiento de fuente, encaminamiento salto a salto o encaminamiento centralizado.

2.7.1. Encaminamiento de fuente

El camino es calculado en su totalidad por el nodo origen, en este caso, por el nodo de ingreso de la red OBS. Este es el tipo de encaminamiento habitual, por ejemplo, en redes orientadas a conexión que emplean MPLS o GMPLS (Mannie 2004). La principal ventaja del encaminamiento de fuente se debe a que al poder conocer en el nodo de ingreso la ruta completa de la ráfaga, es posible determinar con exactitud el tiempo *offset* necesario cuando se emplea el protocolo JET. Por otro lado tiene la desventaja de no poder reaccionar ante problemas puntuales en el camino, por

ejemplo las situaciones de contienda en las que dos o más ráfagas han de salir por el mismo canal en el mismo instante de tiempo, y poder ofrecer caminos alternativos.

En una WROBS, realizar el encaminamiento de fuente tiene el riesgo de aumentar las situaciones de contienda. Cada fuente toma las decisiones de encaminamiento de manera independiente. Por tanto, cuando hay que realizar dos encaminamientos de fuente en nodos diferentes en paralelo, o en intervalos de tiempo tales que la reserva de la primera ráfaga no ha terminado antes de que empiece el encaminamiento de la segunda, cada proceso de encaminamiento de fuente puede escoger tramos comunes en los que no haya longitudes de onda libres para satisfacer a dos conexiones, sino únicamente a una de las dos reservas de ráfaga. En ese caso, una de las reservas se realiza con éxito y la otra reserva falla. Entonces, se tiene que volver a realizar el proceso de encaminamiento de la ráfaga cuya reserva falló y posteriormente realizar un nuevo intento de reserva.

2.7.2. Encaminamiento salto a salto

En este caso no se conoce a priori la ruta, sino que cada nodo toma la decisión independiente de cuál será el siguiente nodo en la ruta de la ráfaga. Éste es el tipo de encaminamiento empleado en redes IP para el transporte de los datagramas (técnica *store and forward*). Asimismo puede verse como un tipo de encaminamiento salto a salto la reserva de un camino mediante RSVP-TE en el que no se especifica la ruta. En este caso, salto a salto se toma la decisión de la ruta del circuito. La principal ventaja de este mecanismo es la flexibilidad en el encaminamiento, ya que permite tomar decisiones en tiempo real en cada nodo. Como contrapartida, en OBS sin confirmación como JET, se imposibilita el conocer con exactitud a priori el tiempo de *offset*. Por lo tanto, o bien se sobreestima el *offset*, o se emplean esquemas en los que el *offset* se introduce nodo a nodo como emulación de *offset* EO (*Emulated offset*) (Klinkowski *et al.* 2009).

2.7.3. Encaminamiento centralizado

IETF ha definido el PCE (*Path computation Element*) en Farrel & Vasseur (2006) como un elemento funcional dedicado al específicamente al cálculo de rutas. Las principales ventajas del encaminamiento basado en PCE son la posibilidad de

emplear algoritmos complejos, la flexibilidad en la elección del algoritmo y su empleo en redes con múltiples dominios y capas. Gracias a poder realizar cálculos complejos, se pueden realizar cálculos en los que se realice la asignación de longitud de onda y se tengan en cuenta las restricciones físicas de la transmisión. Como desventaja, se introduce un retardo adicional en el cálculo de la ruta por el hecho de consultar un elemento externo y la complejidad que agrega.

2.7.4. Pre-cómputo de rutas

Técnica utilizada en redes MPLS, permite calcular las rutas externamente, mediante un PCE o mediante el sistema de gestión, y asignar a cada flujo (identificado por ejemplo por el par origen destino) una determinada ruta. En el caso de redes OBS, de la misma manera, todas las ráfagas que se envían entre un mismo par origen-destino seguirían la misma ruta. El pre-cómputo de rutas es especialmente útil para caminos de protección.

2.7.5. Encaminamiento estático vs dinámico

Las técnicas de encaminamiento se pueden clasificar según los parámetros que se emplean al momento de realizar los cálculos de los caminos. Se denomina encaminamiento estático al empleo de algoritmos en los que los parámetros empleados para el cálculo de rutas se establecen en el momento de operar la red y no cambian en el tiempo. Únicamente, se actualiza la información con el grafo de la red en el caso de caída de enlace o nodo.

Por otro lado, se denomina encaminamiento dinámico al proceso de encaminamiento que emplea parámetros que se actualizan dinámicamente (por ejemplo el costo de los caminos o la carga de los enlaces). Estos parámetros, o bien se diseminan en las extensiones de ingeniería de tráfico, o bien se calculan en los nodos localmente.

La gran ventaja de las técnicas dinámicas es que pueden adaptarse al estado de la red, por ejemplo evitar rutas saturadas, o balancear la carga. El principal inconveniente es que un excesivo dinamismo puede provocar fluctuaciones e inestabilidades en la red.

2.7.6. Importancia del encaminamiento

El algoritmo de encaminamiento es muy importante en el comportamiento de la red. De una parte, un buen encaminamiento puede hacer que el rendimiento global de la red sea mayor. En el caso puntual de una red de OBS, con una buena distribución de las ráfagas, se puede evitar las situaciones de contienda entre ráfagas, por lo que ayuda a reducir la probabilidad de bloqueo global. Igualmente, empleando mejor los recursos disponibles en la red se reducen las necesidades de ampliación de capacidad en los equipos y pueden posponerse las inversiones que puedan ser necesarias.

2.7.7. Algoritmos de Encaminamiento

La solución ampliamente empleada en los procesos de encaminamiento es emplear un algoritmo de camino de menor costo. Sin embargo, el principal problema de las técnicas de encaminamiento que escogen un único camino fijo para un par origen destino es que pueden saturar en exceso determinados enlaces, los cuales pueden convertirse en cuellos de botella, mientras que otros enlaces de la red pueden estar desocupados o con muy baja carga (no se tiene la opción de balance de carga). Para mejorar este comportamiento, se propone calcular dinámicamente el mejor camino para cada par origen destino. En la Tabla 2.7 se presenta un conjunto de técnicas de encaminamiento para OBS, con información puntual y relevante. Para un listado completo de todas las técnicas propuestas en la literatura, se puede acudir a los estudios de González de Dios *et al.* (2007) y Klinkowski *et al.* (2010). Hay que destacar un tipo particular de encaminamiento, el encaminamiento por deflexión, tratado en detalle más adelante y que se emplea cuando hay una situación de contienda en el camino inicialmente escogido, y se hace necesario buscar una alternativa en tiempo real.

Para el caso puntual de las redes OBS el proceso de encaminamiento por lo general está acompañado de la asignación de longitud de onda, este aspecto se abordó con detalle en el Capítulo 1 del presente documento y se tendrá en cuenta en los diseños de los capítulos siguientes.

En seguida se tratan algunas formas de enfrentar la forma de realizar el encaminamiento en redes OBS mediante métodos tradicionales y con el uso de técnicas heurísticas, éstas últimas gozan de mucha acogida especialmente cuando los problemas de encaminamiento se convierten en tipo NP, es entonces cuando se hace necesario resolverlo mediante otras opciones y las heurísticas, meta heurísticas y más recientemente las súper heurísticas aparecen para ayudar en la búsqueda de una solución.

Tipo de encaminamiento	Cálculo de ruta	Información	Referencias
Centralizado	Optimizado	Demanda de tráfico	(Hyytiä & Nieminen 2004), (Teng & Rouskas 2005), (Barradas & Medeiros 2008)
Centralizado	Heurística	Demanda de tráfico (adaptativo)	(Du *et al.* 2006)
Salto a salto	Heurística	*Broadcast*	(Klinkowski *et al*. 2005)
De fuente	Heurística	*Broadcast*	(Thodime, Vokkarane & Jue 2003),(Klinkowski, Careglio & Sole-Pareta 2009)

Tabla 2.7. Comparación de algunos algoritmos de encaminamiento

- **Calculo de rutas optimizado**

Una forma de enfrentar el encaminamiento en las redes OBS es mediante ingeniería de tráfico TE (*Traffic Engineering*) y mediante técnicas de optimización, en las redes en general esto se puede hacer mediante programación lineal, es decir dada una matriz de tráfico, encontrar el conjunto de rutas óptimo para cada par origen-destino. En el caso OBS se busca disminuir la probabilidad de bloqueo global en la red. Estas técnicas se vuelven complejas y con alto costo computacional. Hyytia & Nieminen (2004) proponen la técnica MILP (*Mixed Integer Linear Programming*) para el cálculo de las rutas. Posteriormente Teng & Rouskas (2005) mejoran lo anterior introduciendo la probabilidad de bloqueo cuyo cálculo se hace mediante la fórmula de Erlang B y mediante el empleo de conversores de longitudes de onda. En este caso como la fórmula de Erlang no es lineal se hace necesario realizar

aproximaciones lineales por trozos y la propuesta tiene buena respuesta cuando las ráfagas que tienen el mismo origen y destino se reparten entre varias rutas.

De otro lado Barradas y Medeiros (2008) continúan con la aproximación de la optimización dada una matriz de tráfico y proponen una técnica en dos pasos. En primer lugar, se calcula mediante un ILP (*Integer Linear Programming*) los *k* caminos más cortos con menor traslape y, en una segunda fase, se escoge entre ellos, también mediante un ILP, el conjunto de caminos que minimicen un determinado criterio. Se proponen dos criterios, de una parte se busca escoger los caminos que minimicen la carga del enlace más congestionado de la red MCL (*Maximum Congested Link*). Por otro lado, el criterio es escoger los caminos que minimicen la probabilidad de bloqueo del camino con mayor probabilidad de bloqueo estimada MEC (*Maximum end to end congested path*).

- **Técnicas heurísticas para optimizar rutas estáticas**

Para reducir el tiempo de cálculo de los algoritmos optimizados basados en ILP en redes con un gran número de nodos, se proponen heurísticas cuyo comportamiento se acerque al óptimo. Teng & Rouskas (2005) proponen dividir el problema en dos partes, en primer lugar emplear una optimización basada en LP (*Linear Programming*) para calcular un conjunto de rutas.

La ventaja de este paso es que se trata de programación lineal (y no entera), por lo que se resuelve más rápido, pero hay valores que no indican claramente un resultado, por lo que hay pares origen destino cuya solución oscila entre varias posibilidades. En una segunda parte de la técnica heurística de Teng y Rouskas (2005), entre los pares origen destino con varias posibilidades, se ordenan los caminos por número de saltos, y se prueban varias combinaciones, evaluando la probabilidad de bloqueo de cada solución.

Du *et al*. (2006) proponen emplear directamente, en vez de un ILP una modificación del algoritmo de Dijskstra, denominada ALB-Dijkstra (*Adaptive Load Balancing-Dijkstra*), mediante la cual calculan un conjunto de rutas (una por cada par origen destino) que balancean la carga en la red con la que logran reducir la probabilidad de bloqueo global. La mayor ventaja es la rapidez con la que se ejecuta el algoritmo.

- **Heurísticas adaptativas**

Las técnicas anteriores proporcionan un camino óptimo a partir de una determinada distribución de tráfico conocida. Sin embargo, este dato no siempre es posible conocerlo, y, aún en caso de conocerlo, el tráfico real puede diferenciarse del previsto. Por ello, las técnicas de encaminamiento adaptativas buscan reaccionar ante las distintas situaciones en la red.

Hay algoritmos que reaccionan ante situaciones en la red. Por ejemplo, Thodime, Vokkarane & Jue (2003) proponen la técnica denominada CBSR (*Congestion-Based Static-Route Calculation*). Esta técnica realiza encaminamiento de fuente, por lo que el nodo origen de las ráfagas es el único encargado de tomar las decisiones en cuanto a la ruta de la ráfaga. Se calcula de forma estática un conjunto de caminos disjuntos alternativos y se selecciona uno de ellos de forma dinámica en base a la información de congestión recolectada de los nodos del núcleo. En los nodos se toman medidas de carga de manera periódica en sus enlaces de salida. Si se supera un umbral de carga, se indica que ese nodo está congestionado y se disemina esta información. A la hora de escoger el camino, si el camino más corto atraviesa algún enlace congestionado, se escoge el camino alternativo con menor número de tramos congestionados.

Klinkowski *et al.* (2005) proponen la técnica BP (*Bypass Path*), en la que se selecciona un camino en el nodo de origen del paquete como función del estado de sus colas de salida, por lo que emplea únicamente información local. La ruta sólo puede modificarse cuando el paquete se encuentra con un enlace saturado. En ese caso, el nodo intenta hacer un “bypass” de ese enlace saturado, utilizando un nodo intermedio para alcanzar al próximo salto. En este trabajo también se propone la técnica de ruta distribuida DP (*Distributed Path*), con una o varias alternativas (DP-1, DP-k). Esta corresponde a una estrategia de encaminamiento adaptativa distribuida que emplea información global para la toma de las decisiones. En esta técnica, cada nodo pre-calcula las $\boldsymbol{k}$ rutas más cortas hacia cualquier destino. Posteriormente, el algoritmo elige un camino entre todos ellos en función de un costo compuesto con base en tres parámetros que son: el promedio de ráfagas perdidas de cada enlace ABL (*Average Burst Loss*), la utilización promedio del enlace ALU (*Average Link Utilization*) y la ocupación media de buffer ABO (*Average Buffer Occupancy*). Cada

LSP de la red tiene diferente costo, calculado como la suma de las contribuciones de cada enlace que forma el camino.

Para que los nodos tengan conocimiento de esta información de los demás, cada nodo mide el estado de sus parámetros (ABL, ALU y ABO) en un intervalo de tiempo determinado, y a continuación inunda la red con la información recolectada para que llegue a los demás nodos y estos puedan recalcular el costo de sus caminos.

- **Dificultades de las técnicas revisadas**

Las técnicas analizadas necesitan conocer el valor exacto del tráfico y otras deben conocer el estado de la red para poderlo dar a conocer al resto de la red, esto debe hacerse de forma continua, dando origen al aumento de información en la red. Igualmente, muchas de las técnicas propuestas inducen a inestabilidad y fluctuación en la redes, en la tesis doctoral de González (2012) se muestra el desarrollo de un algoritmo heurístico multi-camino que ayuda a reducir la probabilidad de bloqueo y solo con información local del nodo. De esta forma, al utilizar información disponible en el propio equipo, se reducen los requisitos de intercambio de información con el resto de la red OBS.

Aunque la investigación sobre las formas de realizar encaminamiento especialmente en las redes OBS es un ítem abierto, se puede concluir por el momento que las métricas que emplean encaminamiento dinámico tienen un gran futuro, si a esto se le agregan mecanismos de solución basados en meta heurísticas y además se emplean procesos cognitivos, el resultado puede ser alentador para un futuro.

Finalmente y como resumen, se define que cuando se trabajan técnicas de encaminamiento adaptativo, el establecimiento de caminos ópticos se lleva a cabo en tiempo real, es decir, las conexiones se actualizan al establecerse o terminar una conexión. Esta técnica trabaja creando enlaces dinámicamente, debido a esto se requiere un tiempo mayor para generar el camino óptico, pero permite minimizar la probabilidad de bloqueo.

Se han revisado algunos algoritmos representativos de éste tipo de técnica y otros que pueden ser encontrados en la literatura, entre los ello están: Longitudes de Onda

Disponibles AW (*Available Wavelengths*), Saltos y Longitudes de Onda Disponibles HAW (*Hops and Available Wavelengths*), Longitudes de Onda Totales y Disponibles TAW (*Total and Available Wavelengths*), Número de saltos, Longitudes de Onda Totales y Disponibles HTAW (*Hop Count and Total Wavelengths and Available Wavelengths*), Costo Futuro Modificado MFC (*Modified Future Cost*), Enrutamiento de menor congestión LCPR (*Least Congested Path Routing*), Balance de Carga de Enrutamiento y Asignaciones de Onda LBRWA (*Load Balance RWA*), Desviación de Carga de la Peor Ruta HPLD (*Heaviest Path Load Deviation*), entre otros (Lázaro 2010).

2.8. Resolución de Contención

Además de los elementos considerados en el Capítulo 1 sobre mecanismos para resolución de contención en redes OBS, estos mecanismos están orientados principalmente a resolver la contención que pueda presentarse en las ráfagas, en los nodos tipo *core*. Sin embargo, como se había expresa antes, es posible que se presente congestión con los BCP cuando son enviados a un nodo mediante señalización fuera de banda (canal dedicado). Para el caso puntual del mecanismo JET (más empleado), este paquete BCP es vital para la configuración del camino que debe seguir la ráfaga (o ráfagas). Cuando este problema se presenta, se puede almacenar uno de los BCP causantes de la contienda y como esto puede ocasionar un retardo adicional, algunos autores como Lin *et al*. (2008) proponen un mecanismo de retraso de la ráfaga (en un FDL) asociada al BCP que se almacena.

En el caso de las redes WROBS el proceso es más complejo ya que el servidor de requerimientos o nodo de control recibe peticiones desde todos los nodos de la red, en la tesis doctoral de Miguel (2002) se hace un estudio en detalle de este nodo de control y sus mecanismos de funcionamiento para una correcta atención de las diferentes peticiones provenientes de los nodos de la red WROBS.

2.9. Mecanismos de recuperación de ráfagas perdidas

Una vez revisados los diferentes mecanismos para el control de contención en redes OBS, es necesario aclarar que el contar con estos elementos de control no evita que

las ráfagas puedan perderse o descartarse cuando dicha contención no haya podido ser resuelta de forma satisfactoria. Ante este evento, se tienen dos posibilidades, o bien son las capas superiores (soportadas por OBS) las encargadas de asegurar la fiabilidad de la transmisión (por ejemplo, el protocolo de transporte TCP se encarga de retransmitir los segmentos perdidos), actuando de manera independiente para cada flujo de tráfico, o bien es la propia red OBS la que proporciona mecanismos para asegurar que los datos no se pierdan.

La tabla 2.8 resume los principales mecanismos de recuperación al interior de la red OBS para que no sea necesario recurrir a capas superiores. El recurrir a las capas superiores puede interpretarse como signos de congestión por perdida de ráfagas, y como consecuencia se pueden tomar decisiones erróneas. En otros casos, puede implicar retardos elevados en la aplicación hasta que se recupera del fallo, o bien, por ejemplo en el caso de servicios de vídeo en tiempo real, se degradaría el vídeo. Sin embargo este es un elemento importante para la propuesta de contar con un *Cross Layer* que pueda permitir de una forma más adecuada resolver los problemas de perdida de ráfagas y suavizar su impacto sobre aplicaciones con restricciones de perdida de información.

Mecanismo	**Explicación**	**Referencias**
Retransmisión de ráfagas	En principio este proceso debe reducir la probabilidad de bloqueo global, es una técnica ARQ (*Automatic Retransmission Request*) un mensaje tipo NACK puede ser enviado desde el nodo donde se perdió la ráfaga por cualquier motivo. Esto implica que el emisor debe guardar una copia de la ráfaga (que puede eliminar posteriormente), el principio de funcionamiento se asemeja al protocolo básico *stop and wait*.	Zhang *et al.* (2006)
Empleo del FEC	Con la técnica *Forward Error Correction* empleando la información redundante que puede enviarse en ráfagas separadas o en la misma ráfaga. Aunque presenta ciertos inconvenientes por aumentar el tamaño de las ráfagas o en número de las mismas, puede compararse en resultados al empleo de un tiempo *offset* extra.	Arima *et al.* (2007)

Clonado de ráfagas	Se propone clonar una ráfaga y enviarlas por rutas diferentes, aunque se presentan muchos interrogantes al respecto, pruebas hechas sobre TCP se muestra un buen desempeño de estos flujos	Jue & Vokkarane (2005), Sullivan, Charbonneau & Vokkarane (2010)

Tabla 2.8. Alternativas para aliviar la pérdida de ráfagas en redes OBS

En general, existen diferentes procedimientos y algoritmos de transporte de información en redes cableadas LAN, MAN y WAN que pueden ser adaptadas al funcionamiento y operación de OBS con el objetivo de mejorar ciertos procesos, el objetivo es probar estos protocolos, procesos y procedimientos que han sido exitosos a lo largo del tiempo.

2.10. Desarrollos OBS e implementación de *testbeds*

Siendo OBS una técnica de conmutación óptica de información que ya tiene cierto tiempo de haber sido propuesta como alternativa de transporte en las redes ópticas, aún no encuentra un mercado sólido para ser implementada como solución real en empresas del sector. Solo desde el año 2003 se cuenta con laboratorios concretos donde se desarrollaron experimentos que permiten vislumbrar la viabilidad tecnológica de OBS.

La tabla 2.9 muestra un resumen de las principales *test beds* o laboratorio de pruebas desarrolladas y sus características Maier (2008) y De Miguel (2013).

Testbeds	**Característica**	**Tecnología de conmutación**
ATDnet	Primer prototipo OBS probando el protocolo JIT. Baldine *et al.* (2002)	MEMS
JGN II	Prueba del protocolos de reserva en dos sentidos. Sahara *et al.* (2005) y Kitayama *et al.* (2005)	MEMS y PLC.
BUPT	Pruebas de TCP sobre OBS en	SOA

	conjunto con GMPLS. Guo *et al*. (2005), Zhang *et al.* (2006), Zhan *et al.* (2007), Wu *et al.* (2008), Nawaz *et al.* (2009) y Hong *et al.* (2009).	
Tokio University	*Test bed* completo de OBS. (Kitayama *et al.* 2005)	PLC
OITDA	*Fast Switching*. (Tanemura, Amin & Nakano 2009)	PLZT
Essex University	Aplicaciones sobre OBS. (Zervas *et al.* 2009).	SOA

Tabla 2.9. Principales experimentos tipo *test beds* sobre OBS

2.11. Arquitectura de red OBS

Una vez que se han analizado en detalle los aspectos fundamentales de OBS como ensamble de ráfagas, control de contención, señalización y QoS, se procede a realizar la descripción genérica del **modelo funcional** de una red OBS. Como se ha mencionado anteriormente y teniendo en cuenta la figura 2.2 una red OBS consta de nodos de interconexión (nodos centrales o nodos *core*) y nodos de frontera o borde de ingreso y egreso, los nodos están conectados por enlaces principalmente mediante la tecnología WDM (o DWDM). Aunque una arquitectura de red OBS se diseña y se propone su implementación con cobertura WAN principalmente y para transporte de diferentes clases de información provenientes de distintas redes cliente (IP, ATM, SONET), en esta ocasión se enfoca desde la perspectiva de transporte de datagramas IP lo cual ayuda a cumplir con los objetivos propuestos en esta Tesis.

Una vez que se cuenta con el modelo funcional de OBS, se proponen diferentes modelos de nodos de borde y nodos centrales, de todos los modelos planteados algunos son tomados de las patentes de la tecnología y otros son modificados por el autor. Con estos modelos se alimenta el proceso de diseño que se realiza en el Capítulo 3 siguiente donde mediante la ayuda de una metodología de diseño se obtienen los modelos para luego realizar la evaluación de los mismos mediante procesos de simulación (Capítulo 4).

2.11.1. Modelo funcional de red OBS

Para el diseño y realización de los diferentes modelos de prueba de la red OBS no centralizada se propone el diagrama en niveles que muestra la figura 2.26. Esta primera aproximación permite contar con una arquitectura que involucra una serie de aplicaciones, la suite de protocolos TCP/IP según RFC 1180 (1991) y como sub red se define una red OBS, este modelo se infiere a partir de las funciones que se han atribuido a lo largo de la literatura técnica a las redes OBS. Seguidamente en la figura 2.27 se muestra un diagrama en bloques sobre la funcionalidad de la red OBS discriminada por componentes, se destacan las funciones que realizan los nodos de borde (ingreso y egreso) y los nodos centrales (nodos de núcleo o nodos core).

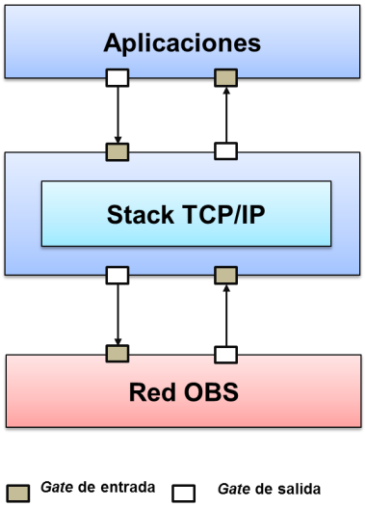


Figura 2.26. Modelo de interrelación TCP/IP y OBS

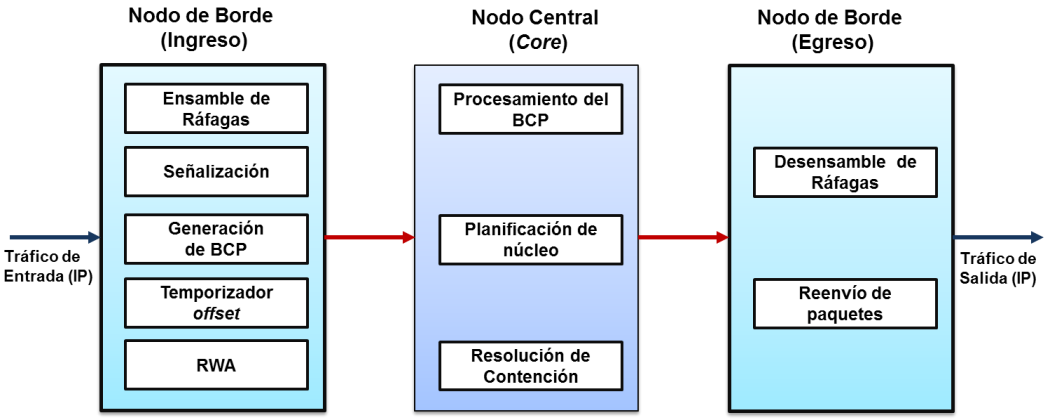


Figura 2. 27. Modelo funcional de una red OBS

Con los elementos anteriores y considerando el modelo descrito en Verma, Chaskar, & Ravikanth (2000) y mostrado en Maier (2008, p. 109) en la figura 2.28 se plantea un diagrama con una división de la arquitectura de protocolos en tres (3) niveles; un nivel IP (*IP layer*) usando un enrutador como generador de paquetes o datagramas IP (icono de Cisco™), el nivel de control de acceso al medio MAC (*Media Access Control*) o *MAC layer* y el nivel Óptico (*Optical layer*) que puede estar soportado en enlaces WDM.

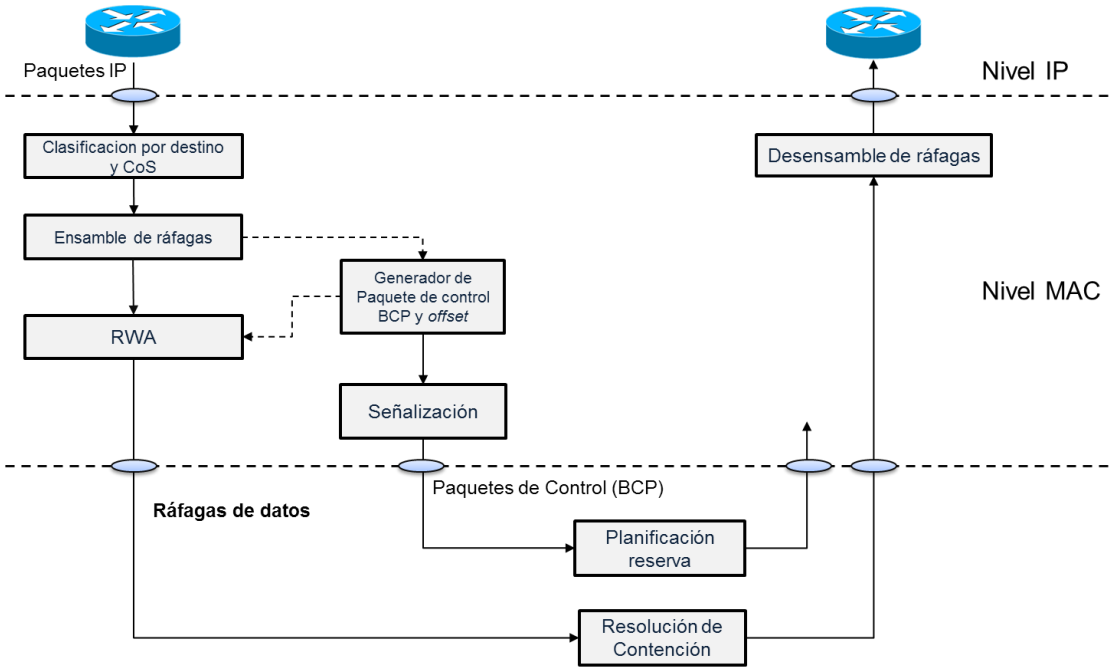


Figura 2.28. Diagrama en bloques de una red OBS (basado en Verma, Chaskar, & Ravikanth (2000))

Según el diagrama en bloques mostrado, el proceso a seguir para la transferencia de información extremo a extremo a través de una red OBS es el siguiente:

- Se asume que un enrutador (o *router*) es el generador de paquetes IP o Datagramas IP, estos datagramas que en general tienen una longitud de 64KB para IPv4 son clasificados por dirección y por clase de servicio CoS y ensamblados en una ráfaga OBS de acuerdo a diferentes algoritmos para ensamblado de ráfagas.

- Una vez se determina el algoritmo para ensamble de ráfagas (principalmente por tiempo o longitud de ráfaga) se procede a su ensamble, posteriormente, tomando

información proveniente del módulo de ensamble de ráfaga se construye el BCP, se resuelve el problema de enrutamiento y asignación de longitud de onda para las ráfagas de datos. En seguida, el BCP se envía por un canal de control y la ráfaga de datos se envía por el respectivo canal de datos, dependiendo del esquema de señalización seleccionado (*one way* y *two way*), en general entre el BCP y la ráfaga se tiene un tiempo *offset*.

- En los nodos intermedios, el paquete de control es procesado y de acuerdo con la información que transporta se configura el camino que deba seguir la ráfaga hasta alcanzar el destino. En los nodos intermedios se puede presentar el problema de contención de ráfagas como se ha anotado anteriormente, existiendo diferentes métodos para solucionar esta dificultad.

- Una vez que las ráfagas llegan al destino, se procede a su desensamble y posterior entrega a los clientes de la red OBS.

2.11.2. Nodo de Borde (*Edge Node*)

Este nodo es el encargado de realizar diferentes funciones en su operación como nodo de ingreso y nodo de egreso, la mayoría de funciones las desempeña en el dominio electrónico, tanto para el ensamble de las ráfagas de datos como en la generación del BCP. Una vez el BCP está listo para ser enviado, se convierte al dominio óptico y en un canal de control dedicado (λ) se envía al nodo siguiente según la ruta definida, en cada nodo se convierte al dominio electrónico para la reserva de recursos, hasta llegar al nodo final. Igualmente sucede con la ráfaga, una vez resuelto el problema de enrutamiento y asignación de longitud de onda, la ráfaga de datos se convierte al dominio óptico en el cual permanece hasta llegar al destino. Una vez la ráfaga llega al nodo de destino se convierte al dominio electrónico, se desensambla y se entrega a los elementos clientes del destino.

Existen distintos modelos de los nodos de borde propuestos a través del tiempo, en la sección siguiente se describen algunos de estos modelos, en cada uno de ellos se destacan los bloques funcionales y su operación. La información consignada se emplea como insumo para los diseños de la red OBS en el siguiente Capítulo.

- **Descripción del Nodo Borde de Ingreso**

Aunque en la literatura se han propuesto modelos de nodos de borde como referentes y como modelos de simulación, la mayoría de modelos incluidos en esta sección se basan en patentes cuya autoría recae en Xiong, Vandenhoute & Cancaya (2004). Se busca que cada modelo cumpla con las funciones básicas desde tomar tráfico de entrada en forma de unidades de datos de protocolo o PDU (*Protocol Data Unit*) y generar una ráfaga que los contenga de acuerdo con los mecanismos de ensamble definidos.

El primer modelo se muestra en la figura 2.29 donde aparece la configuración general de un Nodo Borde de Ingreso (*Ingress Edge Node*), el cual está compuesto por diferentes entradas de paquetes que ingresan a través de tarjetas de línea (a nivel hardware) las cuales van a un conmutador y posteriormente estos paquetes son ensamblados en ráfagas que luego van a una cola de ráfagas, un planificador, un controlador de transmisión, memoria distribuida y finalmente un módulo de transmisión para BCP y ráfagas. Se nota como el modulo que transmite el BCP lo hace tomando un canal de control del grupo CCG (*Control Channel Group*) y para la ráfaga de datos DB (*Data Burst*) se toma un canal del grupo DCG (*Data Channel Group*) respectivamente.

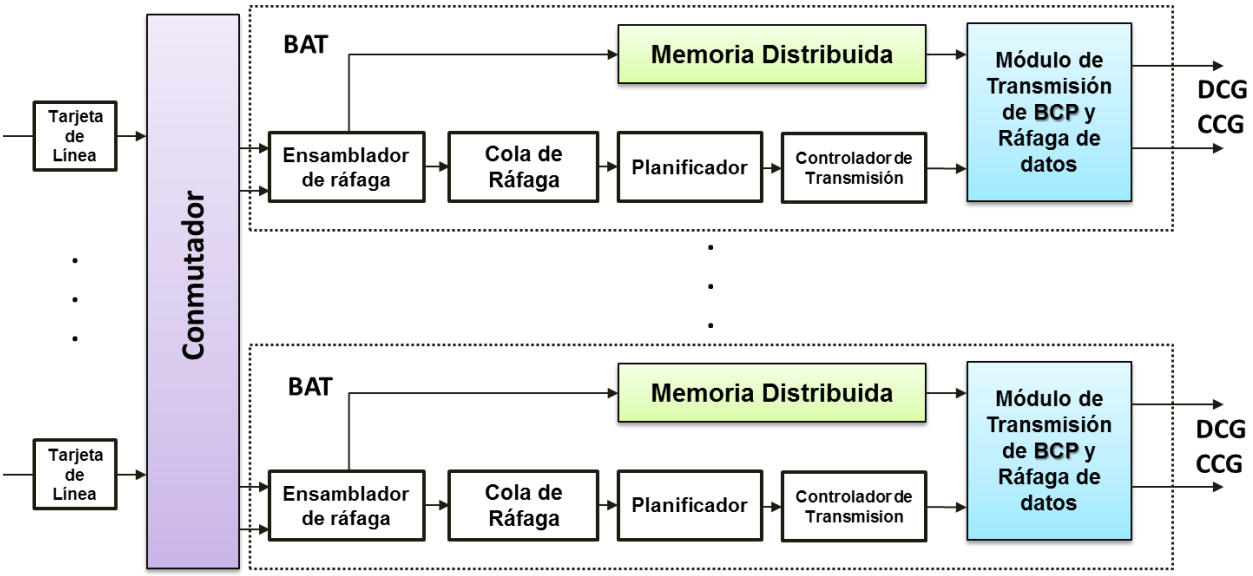


Figura 2.29. Nodo Borde de Ingreso (*Ingress Edge Node*) en una red OBS

Los paquetes de datos entran primero a las tarjetas de línea, en seguida llegan a un conmutador tradicional que opera como un encaminador electrónico. Las tarjetas de línea (que pueden ser tarjetas de red LAN) realizan funciones de niveles 1 (físico) y 2 (enlace de datos) tales como encapsulamiento y desencapsulamiento de información, manejo de tablas de ruta, clasificación de tráfico, control y conformación de tráfico, y posteriormente enviar los paquetes de datos hacia el conmutador.
Un siguiente aspecto se refiere a la dirección que coloca en los paquetes y que corresponde al nodo de egreso o dirección de destino que puede ser empleada más adelante para clasificar los paquetes al momento de realizar el ensamble de las ráfagas. El conmutador recibe los paquetes que llegan desde las tarjetas de línea y los envía hacia los ensambladores de ráfagas o *burstifiers* en la tarjeta principal BAT (*Burst Assembler and Transmission*) a través de múltiples enlaces electrónicos.

La figura 2.30 muestra un ejemplo de un ensamblador de ráfagas, este módulo está conformado por un receptor de paquetes, un procesador y múltiples recipientes, cada uno de ellos incluye un temporizador (*timer*) y un contador (*counter*), en principio el ensamble de las ráfagas se hace teniendo en cuenta la dirección de destino y a los requerimientos de calidad de servicio. Si es el caso de tráfico multidifusión (*multicast*) el ensamble de ráfagas se debe hacer conforme a múltiples destinos o grupo de direcciones, aunque para el caso de estudio se considera tráfico con características unidifusión (*unicast*).

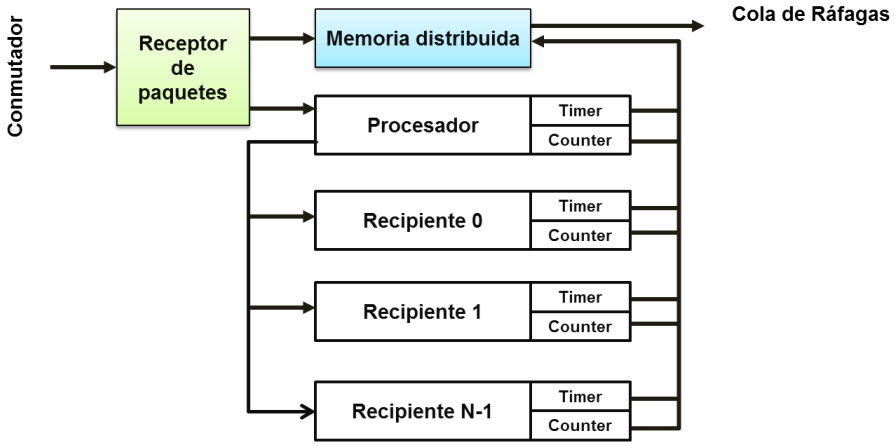


Figura 2.30. Propuesta de ensamblador de ráfagas (*Burstifier*)

El temporizador almacena el tiempo transcurrido desde que el primer paquete llega al recipiente (almacén) cuando el *timer* excede el tiempo de ensamble predeterminado

(umbral definido como $\boldsymbol{T}$) se cuenta entonces con una ráfaga ensamblada. El temporizador envía la información hacia el procesador e indica al mismo que envíe la ráfaga hacia la cola de ráfagas. Por su parte el contador almacena el número de bytes acumulados en el recipiente, cuando el contador excede la longitud de ráfaga máxima $\boldsymbol{L_{MAX}}$ o $\boldsymbol{B_{MAX}}$ (en bytes), se ensambla una ráfaga. El contador envía esta información al procesador para que la ráfaga ensamblada sea enviada a la cola de ráfagas. Para que una ráfaga sea enviada a la cola es necesario enviar la ráfaga desde el recipiente hasta a la memoria distribuida, igualmente, se genera un BCP el cual en conjunto con la ráfaga se envían a la cola de ráfagas.

A partir de esta propuesta se generan los algoritmos de ensamble que serán abordados en capítulo siguiente, con sus respectivas variantes. Pero continuando con el modelo propuesto inicialmente, se muestra a continuación un ejemplo de un algoritmo de ensamble, se supone que el tiempo de ensamble de ráfaga de un recipiente $\boldsymbol{i}$ es $T_a(i)$, donde $0 \leq i \leq N-1$, donde N algunas veces llamado N_e, es el número de nodos electrónicos de egreso presentes en la red, igualmente, sea $T_c(i)$ el temporizador del recipiente y $L_b(i)$ la longitud de la ráfaga en bytes en el respectivo recipiente. Se busca que cada vez que un paquete de datos llegue a un recipiente vacío se comience a contar el tiempo, y cuando el tiempo recorrido sea igual a $T_a(i)$ o el número de bytes en el recipiente alcance el valor en bytes, se ensambla una ráfaga con longitud $L_b(i)$ y este valor se coloca en cero nuevamente, en seudocódigo se tiene lo siguiente:

1) cuando un paquete de longitude **x** bytes llega al recipiente **i**:

```
    If (Lb(i)=0)
        { Tc(i)=0; Lb(i)=x; }
    else if (Lb(i)+x < LMAX)
        {Lb(i) = Lb(i)+x;}
        else
            {reporta la llegada de una ráfaga de longitude Lb(i);
            Tc(i)=0; Lb(i)=x; } // reinicia con la llegada de un Nuevo paquete de
        tamaño x
```

(2) When $T_c(i) = T_a(i)$

```
    { reporta la llegada de una ráfaga de longitude Lb(i);
    Lb(i)=0; }.//reiniciar el contador de longitud.
```

De este seudocódigo se puede inferir el caso cuando se presenta el algoritmo mixto en el cual la ráfaga es enviada cuando se cumpla $\boldsymbol{L_{MAX}(i)}$ o $T_a(i)$, (lo que ocurra primero). De otro lado no muestra el caso cuando se define un umbral para el tamaño mínimo de ráfaga ($\boldsymbol{L_{MIN}(i)}$), caso en el cual se propone que se rellene (*padding*) el espacio faltante una vez se llegue a que $T_c(i) = T_a(i)$, igualmente existen otras propuestas que en lugar del relleno se permita que los paquetes que llegan sigan siendo ensamblados hasta que se alcance el valor $\boldsymbol{L_{MIN}(i)}$, entonces se considera que la ráfaga puede ser enviada a la cola de ráfagas.

En la figura 2.31 se muestra un diagrama que describe el intercambio de información entre los diferentes bloques de ensamblador y transmisor de ráfagas.

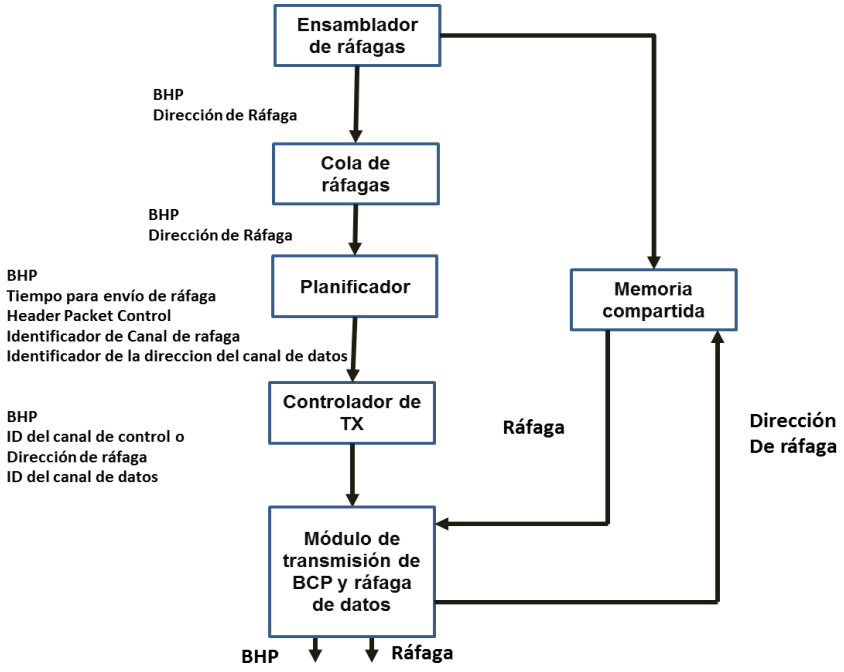


Figura 2.31. Diagrama de intercambio de información entre bloques en BAT

Una vez que la ráfaga es ensamblada en el respectivo ensamblador el BCP y la dirección de ráfaga son transmitidos desde la memoria compartida hasta la cola de ráfagas, la cola de ráfaga actúa como un *buffer*, seguidamente se transmiten al planificador, este planificador atiende a la ráfaga teniendo en cuenta el tipo de ráfaga y los requerimientos de QoS, igualmente, el planificador mantiene un registro de los

tiempos no planificados (tiempos disponibles en el futuro - Horizon) para cada canal de datos.

Para cada ráfaga el planificador encuentra primero los canales de datos y de control con el último tiempo disponible no planificado. En seguida determina el tiempo para enviar el BCP y la ráfaga de datos sobre el canal de control y de datos respectivamente. Se define un tiempo *offset* (T_{offset}) entre el BCP y su correspondiente ráfaga de datos (calculado a partir de la ecuación 2.1). Posteriormente, el planificador modifica el contenido del BCP y lo pasa al siguiente bloque en conjunto con la dirección de la ráfaga, los tiempos de transmisión, y los canales (de datos y control) al controlador de transmisión. El planificador actualiza sus registros con los tiempos no programados de los canales de control y datos.

El controlador de transmisión recuerda el tiempo de transmisión de cada ráfaga y dispara el correspondiente transmisor de ráfaga dentro del módulo de transmisión del BCP y la ráfaga. El controlador de transmisión envía el BCP y el ID del canal de control al módulo de transmisión de BCP y ráfaga cuando es tiempo de transmitir el BCP. El controlador de transmisión envía también el ID del canal de datos y la dirección de la ráfaga hacia el módulo de transmisión de BCP y ráfaga cuando es el momento de enviar una ráfaga.

El módulo de transmisión del BHP y ráfaga está compuesto por diferentes módulos transmisores de ráfagas e interfaces E/O que envían tanto el BCP como la ráfaga hacia los grupos de canales de datos y grupos de canales de control respectivamente. Su operación comienza cuando reciben el BCP y el ID del canal de control, igualmente recibe la dirección de la ráfaga y el ID del canal de datos información proveniente del controlador de transmisión que a su vez ha recibido esta información desde el planificador correspondiente.

Cuando este módulo recibe la información concerniente al BCP (BCP y el correspondiente ID del canal de control), realiza funciones de encapsulamiento de nivel 2 y otras funciones de nivel 1 y posteriormente transmite el BCP. En seguida se realiza una conversión E/O de tipo canal/longitud de onda (especificado con anterioridad), es decir a cada canal de control en este caso le corresponde una longitud de onda equivalente. Posteriormente el modulo recibe la dirección de la

ráfaga y el ID del canal de datos, con la dirección extrae de la memoria la ráfaga respectiva y crea una carga útil (según figura 2.31) para la respectiva ráfaga, posteriormente se hace una conversión E/O de tipo canal/longitud de onda (especificado con anterioridad), y la ráfaga es transmitida, en esta instancia se emplea un MUX DWDM para la multiplexación de los canales (datos y control) en las fibras ópticas disponibles. La figura 2.32 muestra un diagrama del módulo de transmisión para BCP y ráfaga.

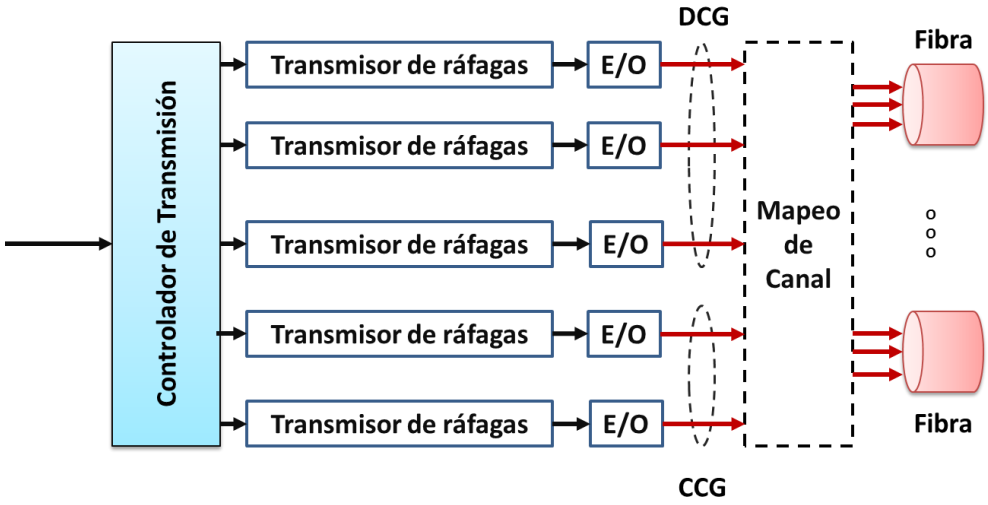


Figura 2.32. Módulo de transmisión de BCP y ráfaga

Como la velocidad de ingreso de los datos es alta (10Gbps o mas) el ensamblador de ráfagas debe hacer su tarea muy rápidamente, debido a esto se han propuesto variantes para el nodo de ingreso, uno de estos diseños propone compartir un módulo planificador y un controlador de transmisión, como se muestra en la figura 2.33, según se anota en el invento patentado, este modelo puede resultar más económico y con un alto grado de eficiencia.

La figura 2.34 muestra una segunda alternativa para el módulo de ensamble y transmisión de ráfagas, es muy similar al módulo de la figura 2.33, sin embargo existe un cambio respecto a la memoria compartida, en este caso los paquetes de datos son almacenados localmente. Esta configuración se prefiere en muchos casos de implementación de nodos de borde para procesos de simulación y derivación de modelos analíticos en redes OBS.

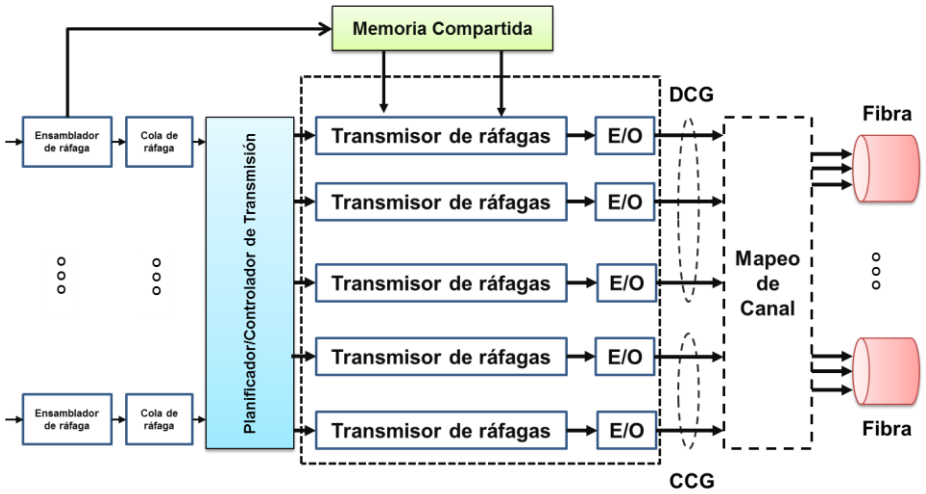


Figura 2.33. Variante del módulo de ensamble de ráfagas con planificador de entrada

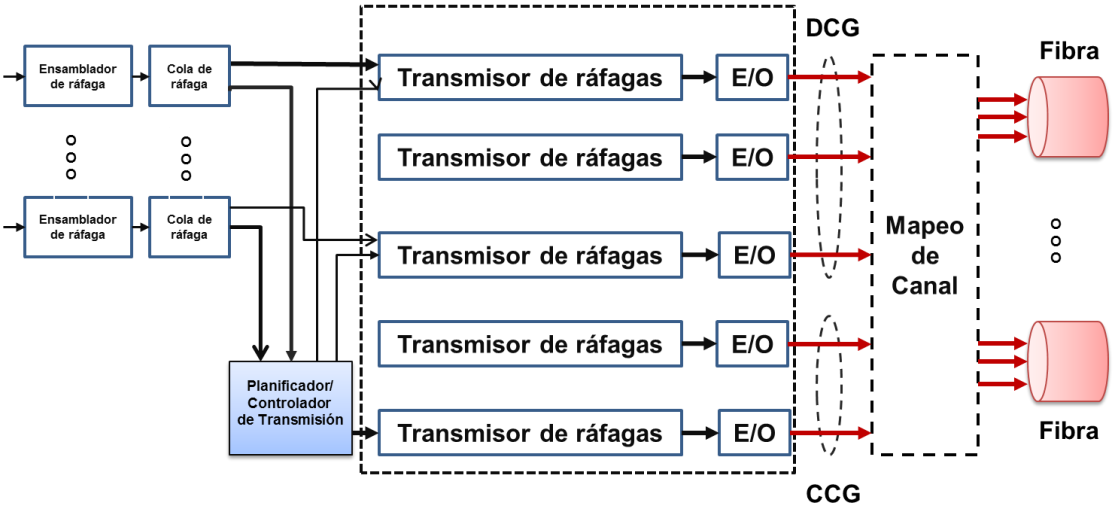


Figura 2.34. Variante del módulo de ensamble de ráfagas con planificación centralizada

Finalmente, la figura 2.35 muestra la arquitectura funcional de un nodo borde de egreso, este puede incluir múltiples receptores de ráfagas y de BHP, módulos para desensamble de la ráfagas, módulos para reenvío de paquetes IP, planificadores y gestores de colas de paquetes, un conmutador y múltiples interfaces de redes de usuarios de destino, estos elementos se repiten para cada canal de datos.

La ráfaga de datos entra inicialmente a un FDL (si se incluye) a través de un grupo de canales de datos, lo mismo acontece con los BCP pero estos ingresan desde un

grupo de canales de control. El receptor de BCP lee la información que trae dicho paquete (BCP) y sabe el momento de arribo de la ráfaga de datos, lo mismo que el ID del canal de datos de llegada y cuál es la longitud de la ráfaga. Este módulo envía dicha información al receptor de ráfaga, posteriormente esta ráfaga se envía al desensamblador respectivo. Este extrae los paquetes IP que fueron originalmente enviados. Si existen problemas como por ejemplo que no lleguen los paquetes en orden o se hayan perdido ráfagas, el gestor de red para tomar acciones al respecto (puede ser retransmitir las ráfagas erróneas o faltantes). Posteriormente los paquetes desensamblados son enviados al módulo de envío IP el cual con base en una tabla de reenvío, se toma la información de dirección de destino de los paquetes de datos y se entregan dichos paquetes al destino determinado.

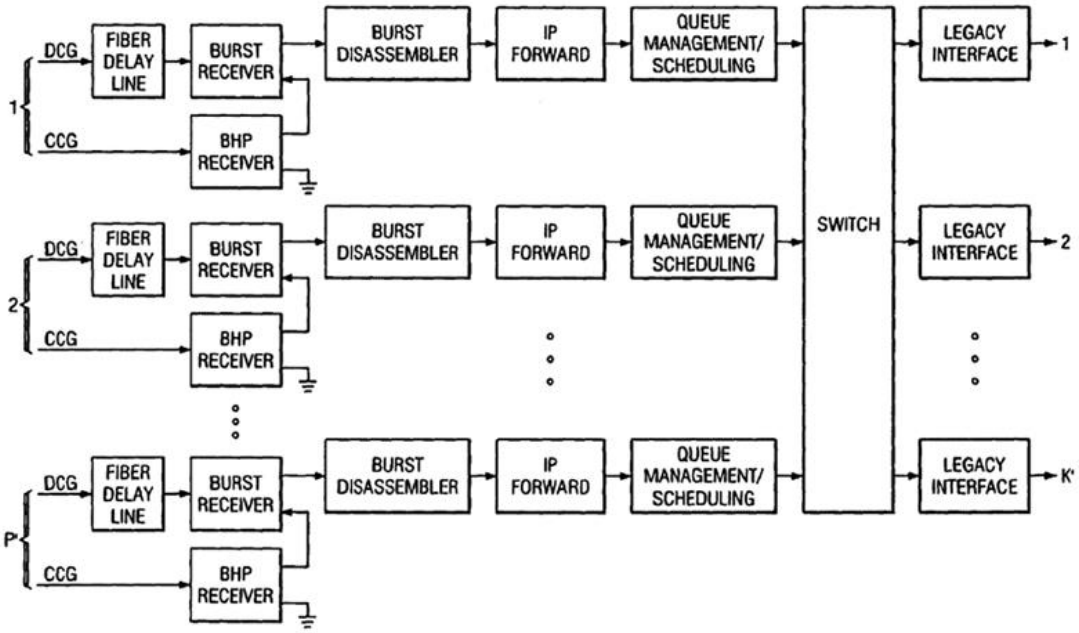


Figura 2.35. Nodo Borde de Egreso (Xiong, Vandenhoute & Cancaya 2004)

En el caso de existir parámetros de QoS que deban seguirse, es necesario considerar el hecho de asignar prioridades, las cuales tienen incidencia al momento de tomar decisiones de contención (por ejemplo) en los nodos centrales o de *core*.

En resumen, la red OBS consta de un nodo borde electrónico de ingreso cuya principal función es ensamblar paquetes de datos en ráfagas, luego se cuenta con un nodo o nodos centrales o de núcleo el cual entre otros sub módulos cuenta con una

unidad de control de conmutador el cual se encarga entre otras funciones de configurar la matriz de conmutación del correspondiente conmutador, esto con el fin de permitir el paso de la ráfaga de datos en el dominio óptico a través de la OBS. La figura 2.36. muestra un nodo de borde de ingreso y egreso donde éste último recibe la ráfaga y posteriormente se desensambla para enviar los paquetes al destino apropiado.

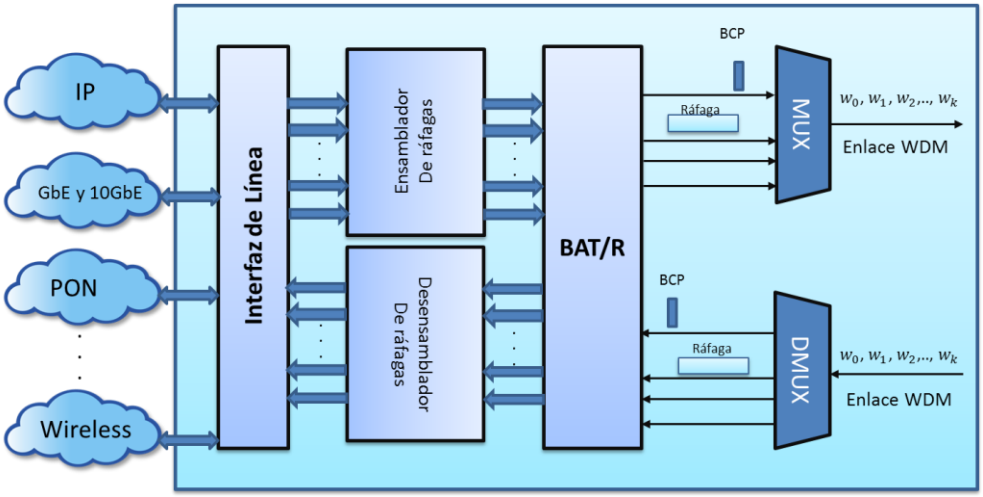


Figura 2.36. Modelo general de un nodo de borde OBS (ingreso y egreso)

Finalmente, la figura 2.37 muestra el diagrama en bloques de un planificador (*scheduler*), debido a la importancia que esta función tiene en al decidir como enviar las ráfagas una vez que se ha conformado.

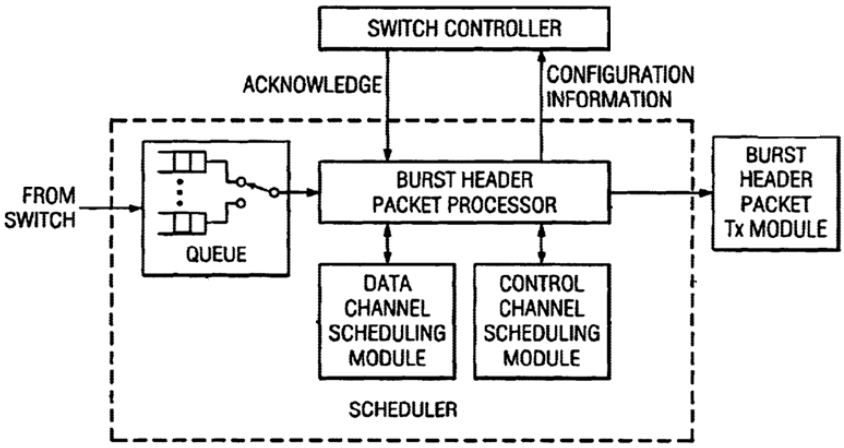


Figura 2.37. Modelo en bloques de un planificador de ráfagas (Xiong, Vandenhoute & Cancaya 2004)

2.11.3. Nodo Central (*Core Node*)

El nodo central se encarga principalmente de las funciones de planificación de recursos y resolución de contención (diversidad de mecanismos de control), además de recibir, procesar y reenviar el BCP, realizar el proceso de conmutación óptica de la ráfaga. En resumen realiza procesos de conmutación y enrutamiento ópticos; conmutación enrutamiento y *buffering* electrónico y funciones de regeneración de señal 3R (*Retiming, Reshaping and Reamplifying*) y de adición y extracción (*add/drop*).

La figura 2.38 muestra un nodo *core* destacando el procesamiento por separado del BCP y la DB. Seguidamente, en la figura 2.39 se muestra un diagrama en bloques del módulo que recibe, procesa y reenvía el BCP.

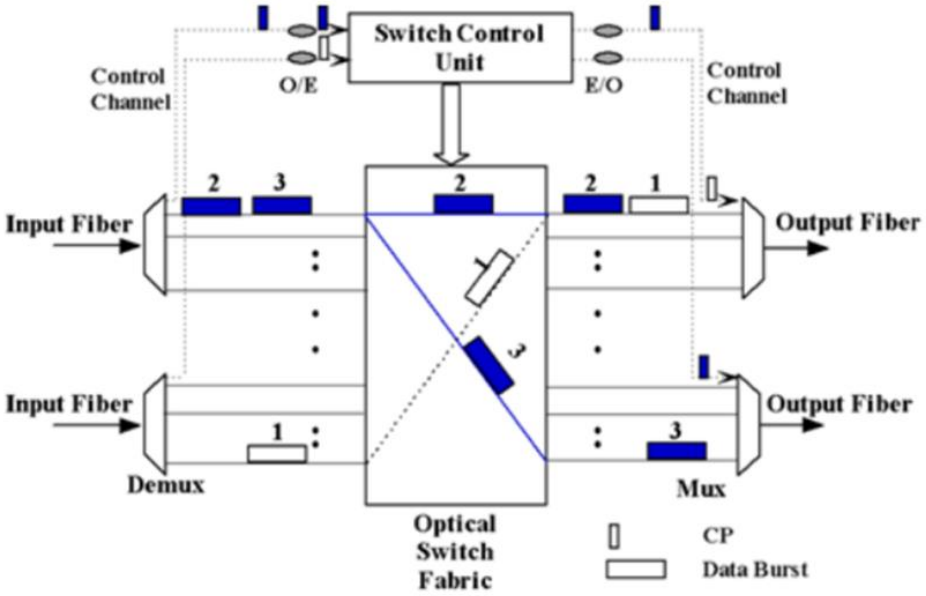


Figura 2.38. Modelo de un nodo central (Cancaya 2004)

Tanto en los nodos de borde como en los nodos centrales, es necesario contemplar la idea de encolamiento, los modelos a emplear en el caso de simulación pueden ser infinitos como el caso de la herramienta OMNeT++ donde las colas (*cQueue*) pueden no tener un tamaño finito de memoria, esto dependería del equipo de cómputo donde se ejecute la simulación. Como es conocido, la memoria RAM tiene un límite y se

debe definir la manera de realizar el encolamiento de la información, la figura 2.40 muestra los modelos de colas más empleados en la actualidad se trata de los modelos Markovianos M/M/1 y M/D/1/K. Esta figura se complementa con la tabla 2.10.

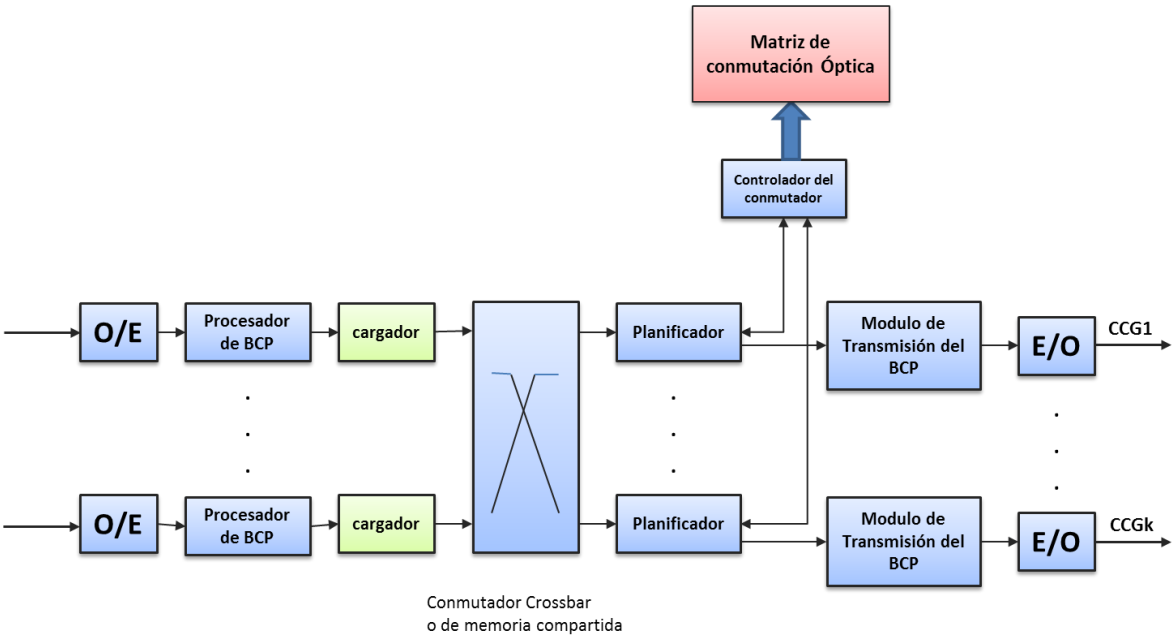


Figura 2.39. Modelo en bloques del procesador de BCP (Xiong, Vandenhoute & Cankaya 2004)

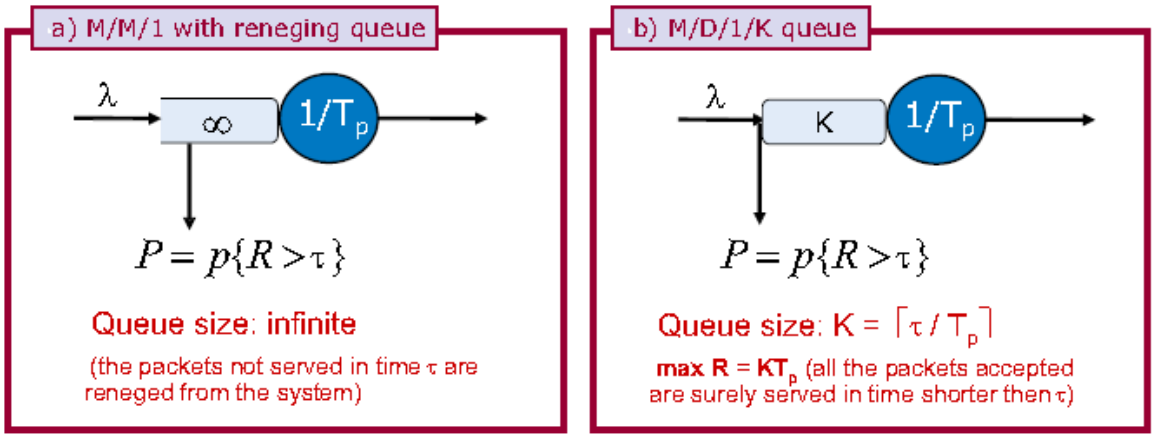


Figura 2.40. Modelo en colas a) M/M/1 con eliminación, b) M/D/1/K (Klinkowsky 2007)

	Packet loss probability	Delay budget
M/M/1 with reneging	$P = \frac{(1-\rho)e^{r(\rho-1)/T_p}}{1-\rho e^{r(\rho-1)/T_p}}$	$\tau = \left(\frac{\ln\left(\frac{p}{1-\rho+p\rho}\right)}{\rho-1}\right) T_p$
M/D/1/K	$P \approx \frac{\rho^{\left(\frac{2r/T_p-\sqrt{\rho}}{2-\sqrt{\rho}}\right)}(\rho-1)}{\rho^{\left(2\frac{r/T_p+1-\sqrt{\rho}}{2-\sqrt{\rho}}\right)}-1}$	$\tau \approx \left(\frac{\left(\ln\left(\frac{p}{1-\rho+p\rho}\right)-\ln(\rho)\right)(2-\sqrt{\rho})}{2\ln(\rho)}+1\right) T_p$

Tabla 2.10. Desempeño de los modelos de colas (Klinkowsky 2007)

Con estos elementos y los incluidos en el Capítulo 1 se tienen los elementos esenciales para realizar los modelos de prueba de los Capítulos 3 y 4.

2.12. Ejemplos de aplicación

Antes de concluir el presente capítulo se incluyen algunos resultados que en conjunto con la literatura consultada, permiten obtener unos resultados preliminares sobre algunos aspectos puntuales, se comienza con algunos modelos que permiten obtener algoritmos de ensamble y posteriormente mediante el diseño de un simulador se muestran resultados de comparación entre sistemas de señalización empleados (JIT, JET).

2.12.1. Impacto de los parámetros de ensamble de ráfagas en la latencia en una red OBS

- **Definiciones y algoritmos iniciales**

En este caso se considera que la autosimilitud no tiene efecto considerable sobre el comportamiento del nodo de borde. Se puede analizar el impacto de la latencia de ensamble de las ráfagas y del planificador en los retardos de la red dado que esta latencia ayuda a que se propague como retardo hacia toda la red.

Con base en un modelo de nodo de borde mostrado en la figura 2.41 en el cual se incluye un **clasificador** de paquetes (básicamente por dirección de destino), un **ensamblador** de ráfagas (*burstifier*), un **planificador** de transmisión (*scheduler*) y un **transmisor** hacia los nodos del núcleo.

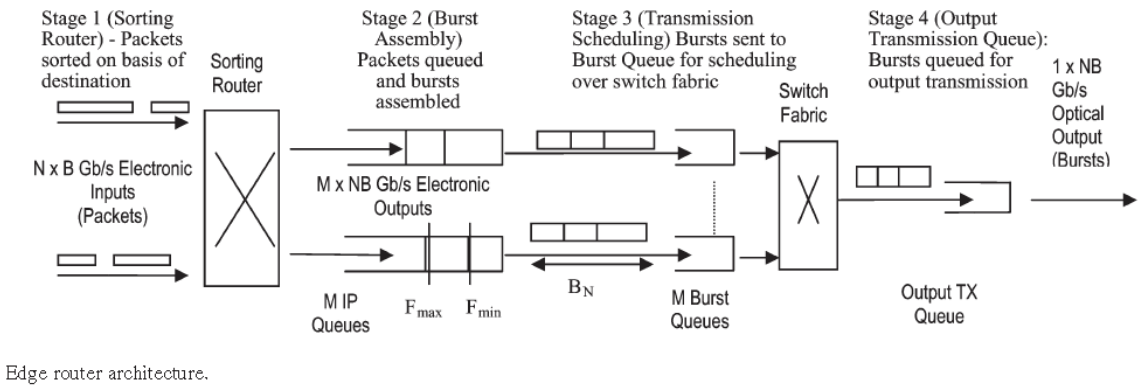


Figura 2.41. Nodo de borde empleado en el ejemplo

En el estado 1 (*stage* 1), se cuenta con $\boldsymbol{N}$ entradas a $\boldsymbol{B}$ Gbps que producen paquetes que van a la entrada del nodo. Los paquetes que llegan pueden tener el mismo uso del canal para todas las entradas. Algunos autores proponen emplear modelos de tráfico donde se muestre autosimilitud y su efecto en la varianza del tamaño de la ráfaga y el tiempo de ensamble, aunque no afecta la latencia total del nodo. M es el número de *buffers* o colas de ensamble.

Para el caso de ensamble se proponen los mecanismos tradicionales por tiempo y por longitud, en el primero cuando un paquete arriba para empezar una nueva ráfaga un temporizador de $\boldsymbol{T}\mu\boldsymbol{s}$ es iniciado, se define $\boldsymbol{D_{max}}$ como la cantidad de datos máxima que se puede recibir en el tiempo $\boldsymbol{T}$ (se mide como $T * bit\ rate$), igualmente se define $\boldsymbol{B_{max}}$ como la longitud máxima de la ráfaga (en paquetes o en bytes), $\boldsymbol{B}$ como el tamaño que obtiene la ráfaga en la medida que llegan paquetes a la ráfaga (variación temporal) y sea $\boldsymbol{B_{min}}$ el umbral mínimo de ráfaga, si para un tiempo $\boldsymbol{T}$, $\boldsymbol{B} \geq \boldsymbol{B_{min}}$ donde $\boldsymbol{B_{min}} < \boldsymbol{D_{max}}$ la ráfaga es enviada a la cola de ráfagas en el estado 3, si esto no sucede se continua con el ensamble hasta que $\boldsymbol{B} \geq \boldsymbol{B_{min}}$, como se ha mencionado con anterioridad otros autores proponen que al vencerse T y no se cumple con $\boldsymbol{B} \geq \boldsymbol{B_{min}}$ se debe rellenar (*padding*) el faltante $\boldsymbol{B} - \boldsymbol{B_{min}}$ hasta que $\boldsymbol{B} \geq \boldsymbol{B_{min}}$.

De otro lado el segundo algoritmo propuesto implica que si antes de vencerse $\boldsymbol{T}$ se tiene que $\boldsymbol{B} \geq \boldsymbol{B_{max}}$ y donde $\boldsymbol{B_{min}} < \boldsymbol{B_{max}}$ y $\boldsymbol{B_{max}} < \boldsymbol{D_{max}}$ la ráfaga se envía a la cola de ensamble (estado 3). El primer algoritmo es un caso especial cuando $\boldsymbol{B_{max}} = \boldsymbol{D_{max}}$ En el estado 3 se puede emplear el algoritmo de la ráfaga que lleva más tiempo OBF (*Oldest Burst First*) a la cual se le da mayor prioridad de envío, este algoritmo se emplea para el caso de ráfagas con longitudes variables. En el estado 4, las ráfagas son enviadas sobre enlaces de salida a 10Gbps hacia el nucleo de la red.

- **Medidas realizadas**

Rajaduray, Blumental & Ovadia (2003; 2004) emplean los siguientes datos para el análisis de un escenario particular:

T=64µs (T puede tomar cualquier además se sugiere normalizar las medidas de latencia respecto a este valor de T). Igualmente, se definen $F_{min}\ y\ F_{max}$ como los factores de llenado de ráfaga, con lo cual se obtienen las relaciones $F_{min} = B_{min}/D_{max}$ y $F_{max} = B_{max}/D_{max}$.

Con estos elementos se puede medir:

- $\Delta_{\mathbf{P}}$: Latencia de paquete, se define como el tiempo promedio que un paquete debe esperar en una ráfaga hasta que esta se llena (ensamblada completamente).
- $\Delta_{\mathbf{B}}$: Latencia de ráfaga, es el tiempo promedio entre la creación de la ráfaga y la llegada a la cola de transmisión (estado 4), esta corresponde a la suma de $\Delta_{\mathbf{BT}}$ (Latencia de transmisión entre los estados 2 y 4) más $\Delta_{\mathbf{BS}}$ (latencia de planificación, corresponde al tiempo de espera en la cola del planificador)
- $\Delta_{\mathbf{B}} = \Delta_{\mathbf{BT}} + \Delta_{\mathbf{BS}}$
- Se tiene que $\Delta_{\mathbf{B}}$ es proporcional a $\boldsymbol{B}$.
- Igualmente la latencia total $\Delta_{\mathbf{T}} = \Delta_{\mathbf{P}} + \Delta_{\mathbf{B}}$.
- El tamaño promedio de la ráfaga y el tiempo de ensamble se pueden medir y normalizar a D_{max} y $\boldsymbol{T}$. La ráfaga normalizada es $\boldsymbol{B_N}$ y el tiempo normalizado de ensamble de ráfaga es $\boldsymbol{T_{BN}}$.
- F_{min}**:** Factor mínimo de llenado de ráfaga. Corresponde al tamaño mínimo de ráfaga B_{min} normalizado a D_{max}.

- F_{max}**:** Factor máximo de llenado de ráfaga. Corresponde al tamaño máximo de ráfaga B_{max} normalizado a D_{max}.

  - **Caso de simulación:**

En los algoritmos de ensamble, se toman los valores antes mencionados normalizados a D_{max}:

a. Algoritmo 1. Para el valor de $\boldsymbol{T}$ se compara si $\boldsymbol{B_N \geq F_{min}}$, entonces la ráfaga es enviada al estado 3, sino, se continua con el proceso de ensamble hasta que $\boldsymbol{B_N \geq F_{min}}$ **.**

b. Algoritmo 2. Igual al caso anterior solo que $\boldsymbol{T}$ aún no se vence para $\boldsymbol{B_N \geq F_{max}}$, donde $F_{min} < F_{max}\ y\ F_{max} = 1$.

Sobre el algoritmo 2 se presentan dos variantes, la primera sucede cuando llega al paquete que hace que $\boldsymbol{B_N \geq F_{max}}$ se almacena con la ráfaga en este caso $\boldsymbol{B_N}$ puede llegar a ser igual a $\boldsymbol{F_{max}}$, la segunda opción es emplear ese paquete para comenzar una nueva ráfaga. En este caso $\boldsymbol{B_N}$ será menor que $\boldsymbol{F_{max}}$. Para tener seguridad que $\boldsymbol{B_N}$ sea mayor que como $\boldsymbol{F_{min}}$ es necesario que $\boldsymbol{F_{max}}$ sea mayor que $(\boldsymbol{F_{min}} + \boldsymbol{P_{max}}/\boldsymbol{D_{max}})$, donde $\boldsymbol{P_{max}}$ representa el tamaño máximo del paquete. Como un caso particula (*hard threshold*), $\boldsymbol{P_{max}}$ se puede escoger con un tamaño de 4416Bytes, aunque este valor puede varia aleatoriamente.

Un posible problema con el algoritmo 1, sucede cuando se tiene baja carga de tráfico, en este caso las ráfagas deben esperar mucho tiempo para ser ensambladas. Una alternativa que se propone consiste en rellenar los espacios faltantes en la ráfaga mediante *padding*, aunque al no considerar este aspecto puede llevar a problemas al resolver la contención en los nodos centrales ya que pueden estar haciendo deflexión de trafico de relleno, además se puede desperdiciar ancho de banda. Como se ha comentado en varias ocasiones, cuando la aproximación es por *timeout* sin importar el tamaño de ráfaga (en principio), se evita que los paquetes esperen demasiado en la cola.

2.12.2. Elementos de evaluación de desempeño para redes OBS

En general para evaluar el desempeño de diferentes tipos de redes se emplean modelos analíticos y el empleo de herramientas de simulación de redes. En seguida se hace referencia a estas dos formas de evaluación, destacando sus beneficios y limitaciones.

- **Métricas de desempeño de OBS**

Algunas de estas medidas son muy comunes para calcular el desempeño de los modelos de red simulados, por lo general se seleccionan algunas de las métricas siguientes.

- Promedio de Probabilidad de bloqueo de ráfaga (BLP). Corresponde al promedio de la fracción de tráfico (en ráfagas) que es descartado por la red OBS y es la métrica más empleada para analizar el desempeño de redes OBS. Este valor se puede calcular mediante la relación dada en la ecuación 2.4.

$$Probabilidad\ de\ Bloqueo = \frac{\sum_{i,j} Requerimientos_{i,j_Bloqueados}}{\sum_{i,j} Requerimientos_{i,j_Totales}} \quad (2.4)$$

- Máxima carga de tráfico ofrecida que permita encontrar el límite del promedio de paquetes IP perdidos. Corresponde a la carga de trafico ofrecida a la red tal que el promedio de paquetes perdidos entre cualquier par de nodos no exceda un valor dado. También permite relacionar el par de nodos con peor desempeño. Puede ser usado para evaluar el desempeño de la red bajo requisitos de Calidad de Servicio o QoS (*Quality of Service*). La medida de la carga normalizada de tráfico está dada por la ecuación 2.5.

$$T_L = \lambda_L * \left(\frac{L}{BW}\right) * \mu \quad (2.5)$$

Donde:
L es la velocidad de la línea (se asume constante para todas las longitudes de onda).
λ_L es la media de la tasa promedio entre arribo por unidad de ancho de banda.

- $Probabilidad\ de\ bloqueo\ ponderado = \frac{\sum_{i,j} Requerimientos_{i,j}_Bloqueados * Min_dist_nodos}{\sum_{i,j} Requerimientos_{i,j}_Totales * Min_dist_nodos}$

  Este parámetro mide la ocurrencia de perdidas sobre todas las pérdidas que puedan ocurrir en el tiempo de simulación.

- $Probabilidad\ de\ Bloqueo\ dependiente\ del\ salto\ H) = \frac{\sum_{i,j,H} Requerimientos_{i,j,H}_Bloqueados}{\sum_{i,j,H} Requerimientos_{i,j,H}_Totales}$

- Medida de los retardos extremo a extremo, en general se calcula con la ecuación 2.6, sin incluir los retardos de ensamble y desensamble de las ráfagas, y muestre el retardo total que una unidad de datos de protocolo PDU tarda en ser transmitido a través de una red desde la fuente (*source*) hasta el destino (*destiny*).

$$D_{end\ to\ end} = N * (D_{tx} + D_{prop} + D_{proc} + D_{queue}) \quad (2.6)$$

  Donde:
  D_{tx} Retardo de transmisión.
  D_{prop} Retardo de propagación.
  D_{proc} Retardo de procesamiento.
  D_{queue} Retardo de encolamiento.

- **Modelo de desempeño analítico en OBS**

Muchos autores consideran que para evaluar el desempeño de una red es mejor emplear modelos analíticos derivados de la probabilidad y estadística matemática. Aunque los modelos a probar en esta Tesis son mayormente mediante meta heurísticas, se consideran algunos elementos de importancia respecto al uso de algoritmos analíticos para medidas de desempeño en redes OBS.

Beneficios:

- Ejecución rápida en el computador de las diferentes métricas de desempeño de la red.
- Computo de valores pequeños de probabilidad de bloqueo, lo cual requiere tiempos de simulación difíciles de alcanzar.

Limitaciones:

- Estos modelos son válidos solo bajo ciertas condiciones de tráfico y de la red OBS modelada.

Condiciones del modelo:

- Red OBS en estado estable.
- Los procesos de arribo de las ráfagas son independientes y tipo Poisson.
- Los eventos de bloqueo ocurren independientemente de un enlace a otro.
- Los nodos de la red tienen o no capacidad total de conversión de longitud de onda.
- El promedio de la probabilidad de bloqueo de ráfagas en cualquier enlace es función de la carga tráfico ofrecida al enlace y el número de longitudes de onda en el enlace (empleando la fórmula de *Erlang B*).
- La carga de trafico ofrecida a un enlace es la suma de la carga trafico ofrecida al enlace por todos los trayectos de ráfagas que lo atraviesan.
- El promedio de carga de tráfico ofrecida por un trayecto de ráfaga a un enlace es disminuida por el promedio de ráfagas perdidas en otros enlaces del trayecto.

- Mecanismo de señalización:

  - **Mecanismo JET** (reserva de recursos en una vía)- ofrece una carga de tráfico reducido por la pérdida de ráfagas en los enlaces precedentes del trayecto como resultado de la reserva de recursos basados únicamente en la información del estado del enlace de salida.

  - **Mecanismo CR** (reserva centralizada y en doble vía) – ofrece carga de tráfico reducido por la pérdida de ráfagas en la totalidad de los enlaces del trayecto como resultado de la reserva de recursos basados en la información del estado de toda la red.

Las ecuaciones de carga del enlace y de la perdida de tráfico en el enlace resultan en un conjunto de ecuaciones no lineales que deben ser resueltas para estimar el desempeño de la red OBS.

Simulador de red OBS

Empleando herramientas software es posible construir dos módulos principales (puede ser en lenguaje C y C++), el generador de tráfico en ráfagas (*Burst Traffic Generator*) y el simulador del núcleo de red OBS (OBS *core network simulator*), este último manejado por eventos y puede modelar los mecanismos JET y CR, con y sin capacidad de conversión de longitud de onda.

Se define que la totalidad de la red cuenta con 64 longitudes de onda por enlace, una capacidad por longitud de onda de 10Gbps, una ráfaga con tamaño promedio de 100kBytes y un tiempo de configuración del OFS (*Optical Switch Fabric*) de 10µs.

Bajo ciertas condiciones, si se obtiene el promedio de la probabilidad de bloqueo de ráfaga versus la carga ofrecida, en redes con topologías regulares (estrella, malla, anillo), pueden obtenerse resultados como los mostrados en la figura 2.42.

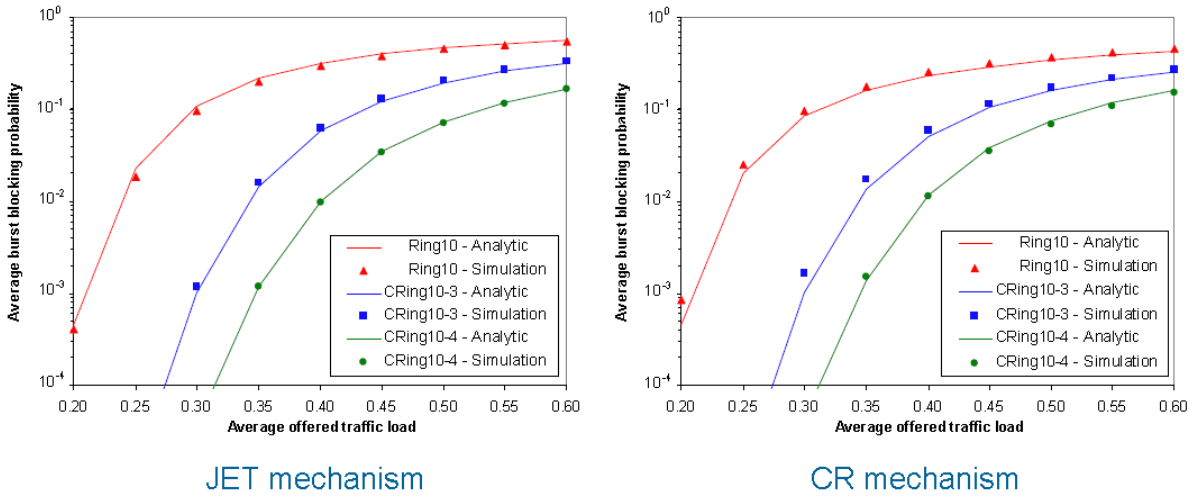


Figura 2. 42. Probabilidad de bloqueo de ráfaga

Para el caso de las redes con topologías irregulares (NSFNeT y COST239), se obtienen las gráficas mostradas en la figura 2.43, donde se observa el comportamiento de la probabilidad de bloqueo respecto a la carga ofrecida para los mecanismos JET y CR.

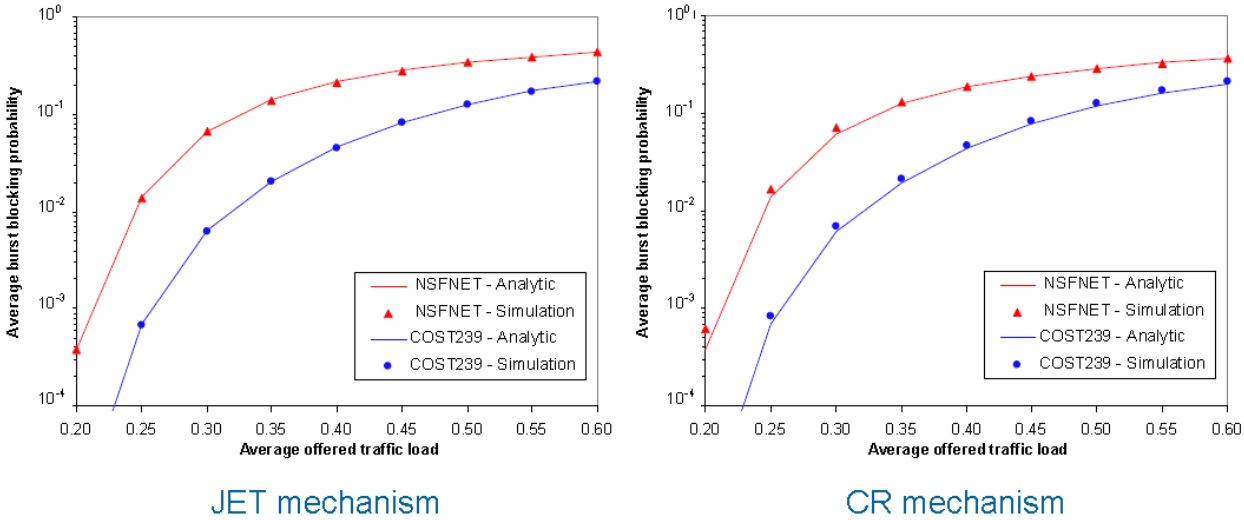


Figura 2.43. Probabilidad de bloqueo de ráfaga vs promedio de carga ofrecida

Con estos elementos es posible sacar algunas conclusiones, entre las que cabe mencionar:

- El promedio de la probabilidad de bloqueo de ráfagas aumenta con el incremento de la carga de trafico promedio ofrecida (como es de esperarse), tanto en los modelos analítico como simulado.
- La probabilidad de bloqueo de ráfaga no depende significativamente del tamaño de la ráfaga.
- La probabilidad de bloqueo de ráfaga es similar a la probabilidad de bloqueo de paquetes IP.

Igualmente, si se comparan los dos métodos de reserva de recursos JET y CR, tanto para redes con topologías regulares como irregulares, los resultados obtenidos se pueden observar en la figura 2.44, el comportamiento de las tendencias es similar aunque no puede afirmarse que las topologías no inciden en los resultados, es importante detallar que por lo general al desarrollar un modelo de simulación, primero se hacen pruebas con topologías regulares como anillo o malla totalmente conectada y luego se emplean las topologías irregulares como NSFNeT, COST 239, GEANT, EON entre otras.

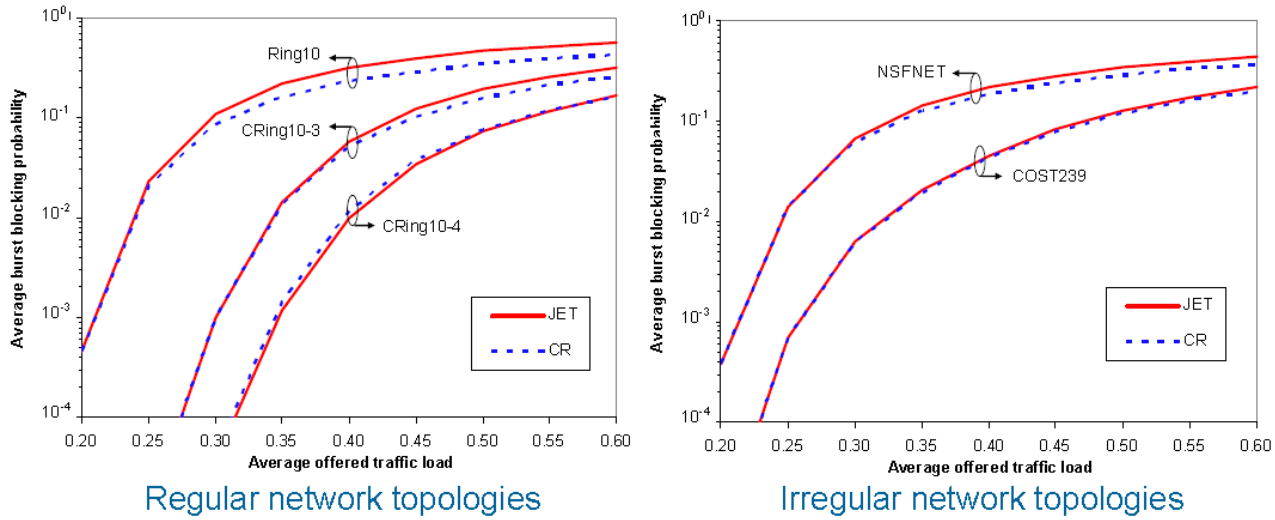


Figura 2.44. Promedio de probabilidad de bloqueo de ráfagas para JET y CR

Respecto al empleo de conversores de longitud de onda, los resultados se muestran en la figura 2.45.

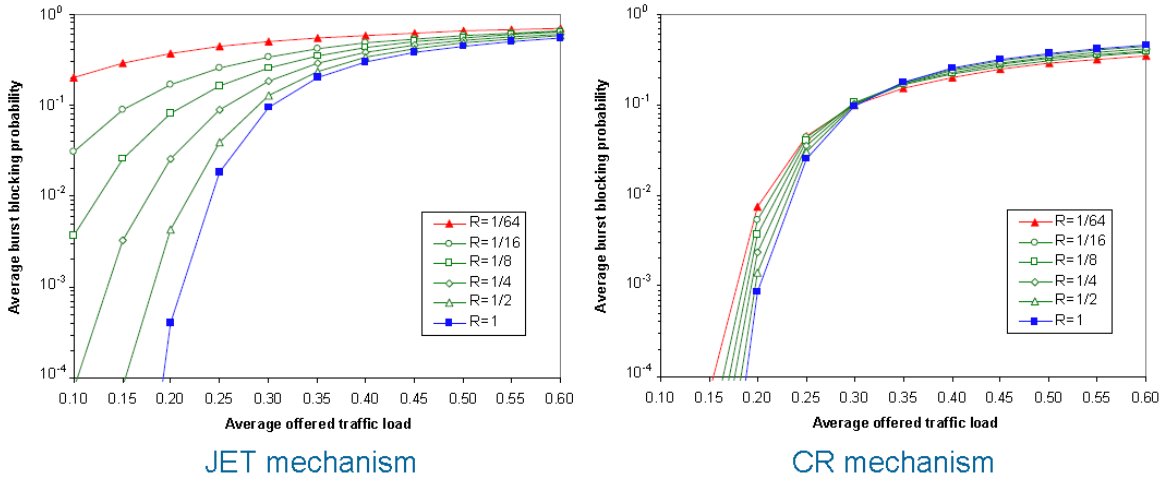


Figura 2.45. Empleo de conversores de longitudes de onda normalizado

Finalmente, al explorar la disponibilidad de recursos en los nodos de una red empleando el mecanismo CR, donde se tiene un conocimiento sobre la capacidad de conversión de longitud de onda, este conocimiento ayuda a minimizar la perdida de los ráfagas solucionando la contención pudiera presentarse.

2.13. Variantes de OBS

2.13.1. LOBS (*Labelled OBS*)

GMPLS es un tecnología que ha evolucionado constantemente y se ha convertido en una infraestructura versátil que puede ser empleada por otras opciones de conmutación a nivel óptico, en principio se aplicó a OCS en la forma de MPλS, donde la longitud de onda es tratada como la etiqueta (cambio de *Label* por λ). En la práctica es un *ligthpath* llamado λ- LSP (*Labelled Switch Path*), aunque no puede cumplir con la función *Add/Drop* en el dominio óptico sino que para agregar trafico cada *lightpath*, para esto se necesita una conversión O/E/O.

De igual manera, lo que algunos autores denominan como una extensión natural de GMPLS hacia OBS denominada OBS etiquetada o LOBS (*Labelled* OBS) fue propuesta por Legrand *et al*. (2008). LOBS se construye sobre OBS haciendo que cada BCP lleve una información adicional. Uno de los mayores beneficios de LOBS es facilitar la integración de IP sobre WDM empleando protocolos basados en IP para realizar el control mientras la conmutación de datos se hace completamente óptica. Al contrario de MPλS, la asociación entre una etiqueta y una longitud de onda no se realiza en el tiempo de una conexión sino que se asocia a cada ráfaga, de esta forma se puede realizar procesos de granularidad por sub-longitud de onda y multiplexación estadística. Aun sin contar con capacidad de conversión de longitud de onda las ráfagas que pertenecen al mismo LSP (denominado LOBS *path*) pueden ser enviadas sobre diferentes longitudes de onda desde el nodo de ingreso, por ejemplo mediante un transmisor sintonizable. Además, las ráfagas que pertenecen a distintos LSP pueden intercalarse sobre la misma longitud de onda, es decir, las ráfagas que llegan sobre LSP distintos (sobre la misma longitud de onda), se pueden mezclar en un LSP adicional.

Para conocer un poco como se comporta LOBS respecto a OBS (tradicional) se muestra en seguida algunos escenarios de prueba y resultados al respecto. Se destaca que para medir los retardos extremo a extremo se puede emplear la ecuación 2.7 para LOBS, el retardo de desensamble no se considera para efecto solo de las ráfagas.

$$D_{end\ to\ end} = D_{ensamble} + D_{prop} + \sum_{i=1}^{N(hops)} (D_{proc} + D_{oxc}) \quad (2.7)$$

Donde:

$D_{ensamble}$ Retardo de ensamble.

D_{prop} Retardo de propagación.

D_{proc} Retardo de procesamiento.

$D_{oxc}\ o\ T_{sw}$ Retardo de conmutación.

La figura 2.46 muestra los escenarios para OBS y LOBS. En esta figura CU es la Unidad de Control y LEtx es el encargado del manejo de la etiqueta y los FDL son líneas de retardo para posible contención o retardos adicionales.

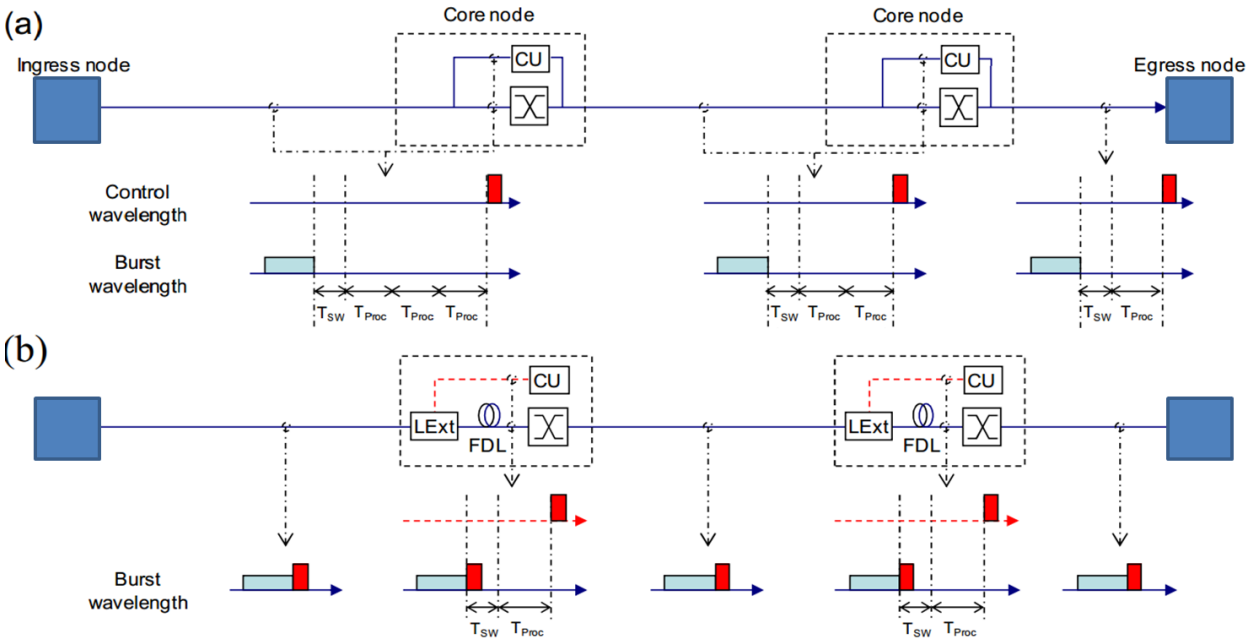


Figura 2.46. Escenarios de prueba para a) OBS y b) LOBS

2.13.2. WROBS (*Wavelength Routed* OBS)

En una red WR-OBS, un servidor centralizado de requerimiento es el responsable de reservar los recursos para las diferentes peticiones de conexión que se realizan a través de la red. Cada nodo de ingreso envía su petición de conexión a dicho servidor (también denominado Nodo de Control Central), en este nodo las peticiones

son colocadas en una cola de acuerdo con la dirección de destino del nodo de egreso y su clase QoS. El servidor centralizado lleva a cabo la asignación de recursos basado en el conocimiento global del estado de cada enlace en la totalidad de la red.

El servidor central es responsable de procesar cada solicitud individual de conexión, calculando una ruta desde la fuente del requerimiento hasta el destino correspondiente, y reservando el número de longitudes de onda requeridas sobre cada enlace a lo largo del camino de la conexión. El nodo borde de ingreso comienza a transmitir la ráfaga de datos únicamente después de recibir un mensaje de confirmación desde el servidor de peticiones. Las redes WR-OBS pueden mejorar el *throughput* de la red, pero su naturaleza centralizada conduce a diseños de red no escalables y por lo general se limitan a redes de tamaño reducido.

El proceso de operación de estas redes es el siguiente: los paquetes de información preferiblemente de Fuentes IP son recibidos por el ***edgeNode*** en su componente electrónico y son clasificados inicialmente respecto a la dirección de destino marcada en cada paquete (*Destiny Address – DA*).

En seguida son enviados a un sub módulo que nuevamente realiza una función de clasificación, pero esta vez por clase de servicio (*Class of Service – CoS*). Estos paquetes son enviados a una cola de un conjunto (*Queue Burstifiers*), donde son almacenados y se construyen las ráfagas según el método definido (por tiempo, por longitud o mixto).

Una vez que la ráfaga ha sido creada, se puede seguir uno de los procedimiento, se envía una petición (*Request*) al **nodo de control** el cual una vez procesada, emite una respuesta (*Response*) que puede ser positiva (**ACK**) o negativa (**NACK**) acorde con la disponibilidad de recursos de transmisión.

2.13.3. TCP sobre OBS

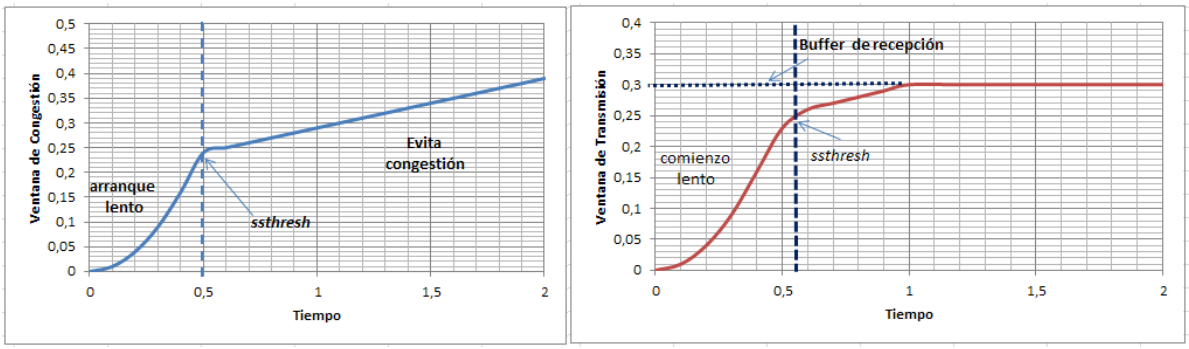
TCP se ha convertido en un estándar de hecho dentro de los protocolos de transporte, soporta la mayoría de servicios web con un porcentaje superior el 95%, al consultar caída (www.caida.org/) se pueden encontrar resultados similares.

Como la mayor parte del tráfico en las redes de datos usa TCP, y se espera que así siga siendo por mucho tiempo, es importante tratar su funcionalidad respecto a OBS. Es importante revisar aspectos sobre los fundamentos de TCP con miras a entender su comportamiento, en especial lo relacionado con su operación y sus procesos de control de flujo y congestión.

Dado que TCP envía información en unidades de datos llamadas segmentos, que son asentidos por el receptor mediante un mensaje ACK. Cada segmento está numerado, para posibilitar su ordenamiento en el destino y detectar posibles pérdidas. Para realizar el control de flujo, TCP emplea un mecanismo de ventana deslizante SW (*Sliding Window*). El tamaño de la ventana de transmisión determina cuántos bytes pueden haber sido enviados por el transmisor sin que aún se haya recibido su asentimiento. Cuando se tienen en tránsito la cantidad de datos como indica la ventana de transmisión, el emisor deja de enviar nuevos segmentos.

Cada vez que se recibe un asentimiento, y si el valor de la ventana de transmisión lo permite, TCP transmite nuevos datos. El valor de la ventana de transmisión esta determinada por el mínimo de dos (2) límites, uno que está impuesto por el receptor, e indica el tamaño del *buffer* de recepción disponible, para evitar saturar el receptor, y otro impuesto por el propio emisor, denominado ventana de congestión, que tiene el objetivo de evitar el envío de más datos que los que la red soporta. En la figura 2.47 se muestran las gráficas sobre las ventanas de congestión y ventanas de transmisión para TCP. Estos datos son claves para el diseño de TCP sobre OBS.

TCP tiene varias fases en la transmisión, en las que el valor de la ventana de congestión varía de manera diferente. TCP empieza la comunicación probando la red, enviando un solo segmento, y fija el tamaño de la ventana de congestión (*cwnd*) a un segmento. Al recibir el asentimiento la ventana aumenta *cwnd* a 2, con lo que se envían 2 segmentos, y así sucesivamente, resultando en un aumento exponencial de la ventana de congestión, como se puede observar en Figura 2.47 a). Este comportamiento se denomina comienzo lento (*slow start*), y finaliza cuando la ventana de congestión alcanza un umbral denominado *ssthresh* (*show start threshold*).



a) b)

Figura 2.47. a) Ventana de congestión TCP y b) ventana de transmisión TCP

Después de la fase de *slow start*, la ventana de **congestión** aumenta linealmente en la fase denominada evitar congestión (*congestion avoidance*) para no saturar la red. En la Figura 2.47 b) se observa la evolución de la ventana de **transmisión**, que corresponde al mínimo entre la ventana de congestión y el tamaño del *buffer* de recepción. Por lo tanto, el valor de la ventana de transmisión en cada momento da una indicación de la tasa de transmisión de TCP, ya que, en ausencia de errores se va a transmitir durante un tiempo de ida y regreso RTT (*Round Trip Time*) como máximo tantos segmentos como indique la ventana de transmisión.

El RTT se define como el tiempo que transcurre desde que se envía un segmento hasta que llega el ACK que confirma su correcta llegada. Así pues, la relación entre la tasa de transmisión, $X(t)$, expresada en segmentos por segundo, y la ventana de transmisión, $W(t)$, expresada en segmentos se muestra en la ecuación 2.8. De esta forma, el rendimiento máximo de TCP viene dado por la ecuación 2.9, donde W_{max} es el tamaño máximo que puede alcanzar la ventana de transmisión.

$$X(t) = \frac{W(t)}{RTT} \qquad (2.8)$$

$$X_{max} = \frac{W_{max}}{RTT} \qquad (2.9)$$

En la literatura se encuentran diferentes versiones de TCP las cuales difieren en distintos aspectos, como resumen la tabla 2.11.

Versión TCP	*Slow start, congestion avoidance*	*Fast Retransmit*	*Fast Recovery*	*ACK Selectivo*
Tahoe	Si	Si	No	No
Reno	Si	Si	Si	No
New Reno	Si	Si	Si	No
SACK	Si	Si	Si	Si

Tabla 2.11. Comparación entre versiones de TCP

Finalmente, para incluir el protocolo TCP en su proceso de interacción con OBS a través del diseño *Cross Layer* se hace un modelo de diseño que se incluye con mayor detalle en el Capítulo 3.

2.14. Conclusiones del Capítulo

Muchos estudios sobre OBS demuestran sus ventajas sobre otras tecnologías de conmutación óptica, especialmente en aspectos sobre granularidad en el manejo del ancho de banda disponible y la compartición estadística de las longitudes de onda entre un flujo de ráfagas, que de otra manera podría consumir muchas longitudes de onda. Sin embargo existen algunos retos a solucionar, entre ellos la elección adecuada del mecanismo o algoritmo de ensamble. Este es uno de los componentes más importantes dentro de las redes OBS que lo distingue de OCS, se refiere a la presencia de algoritmos que se emplean para el ensamble o construcción de las ráfagas (otro aspecto de gran importancia es el relacionado con el protocolo del plano de control empleado para el transporte de las ráfagas a través de la red, el cual se aborda más adelante).

La contienda entre ráfagas es uno de los problemas que más se evidencia en las redes OBS, ya que esta puede provocar que se descarte el tráfico que viaja en las ráfagas. En este capítulo al examinar el estado del arte sobre OBS se han revisado las distintas formas de abordar este problema, al parecer con mejores mecanismos para la elección de rutas y con alto rendimiento de los nodos intermedios al procesar BCP y ráfagas de datos de múltiples fuentes se puede lograr un mejor acercamiento a lo que se desea. Se recuerda que el tráfico en Internet crece a cada instante y cada

vez será más difícil predecir la demanda que dicho trafico hará a las infraestructuras de comunicaciones, en este caso OBS por lo tanto lo consignado en la literatura al respecto queda un poco limitado.

El modelo de ráfaga ha demostrado ser un acierto como mecanismo para el transporte de información sobre redes ópticas, aunque no se puede expresar la última palabra al respecto ya que OBS continua siendo un nicho de investigación abierto y que continúa recibiendo aportes especialmente de la comunidad científica. Aunque ya ha habido empresas que apuestan por OBS la mayoría son de tipo start up, solo se cuenta con alguna empresa de gran cobertura como Huawei Technologies que han presentado soluciones en OBS como OBTN (Jordan 2011). Sin embargo aún no hay ningún despliegue comercial en una operadora. De todas formas OBS es una tecnología que poco a poco fuerza como alternativa para las redes de próxima generación y ha captado el interés de la industria.

Capítulo 3

Cognición, Redes Cognitivas y *Cross Layer*

3.1. Introducción

Los requisitos y expectativas creadas alrededor de la prestación de servicios de telecomunicaciones evolucionan constantemente, es así como los avances en las tecnologías de las comunicaciones especialmente en los dominios óptico e inalámbrico, introducen nuevos paradigmas como el paso hacia infraestructuras completamente distribuidas, evolución de redes pasivas hacia redes activas, redes con control de ancho de banda por demanda, infraestructuras complejas para la creación dinámica de servicios, prestación eficiente de servicios de alta definición, entre otros.

Tradicionalmente se ha buscado que las redes presten sus servicios sin importar la ubicación del usuario y empleando el mínimo de tiempo, desafortunadamente estos aspectos se ven afectados por las limitaciones de diseño propias de Internet (y su suite de protocolos[23] TCP/IP), las cuales por lo general no incluyen soportes para seguridad, movilidad y *networking* activo y adaptable. Debido a esto, diferentes avances tecnológicos han logrado cubrir estos faltantes pero su despliegue e implementación aumenta la complejidad de la red y limita su desempeño. Según algunos autores entre ellos Younis & Fahmy (2003), la razón fundamental para tener poca eficiencia en las redes actuales radica en la dificultad para su configuración y gestión integrada.

[23] En este entorno un protocolo es un conjunto de reglas de sintaxis y semántica que deben seguir los dispositivos para lograr una comunicación.

En este orden de ideas, algunas características como la auto-consciencia, auto-gestión y auto-cuidado (y auto-reparación) están siendo propuestas para optimizar la operación, reconfiguración y gestión de las redes buscando mejorar el desempeño en la transferencia de datos y a la vez trayendo inteligencia a la red, estos aspectos contribuyen con la creación de un nuevo paradigma conocido como *networking* cognitivo o interconexión cognitiva de redes (Fortuna & Mohorcic 2009; Li *et al.* 2012).

Tomando como base lo descrito en Thomas, DaSilva & MacKenzie (2006), el término **Cognitivo** hace referencia a la habilidad que tiene la red para estar "consciente" de su estado de operación y de esta forma ajustar sus parámetros de funcionamiento para completar tareas específicas, esto se logra mediante la detección de cambios en el entorno y en los requerimientos de los usuarios. La **cognición** requiere que los elementos que componen la red (enrutadores, conmutadores, en general los nodos, y otros componentes) tengan el soporte tanto hardware como software adecuado para su despliegue. Las redes actuales pueden realizar tareas específicas como la toma de medidas para configurar la red, y aunque estas son características que hacen parte del paradigma de las redes activas, ésta aun difieren de las redes cognitivas en que no implementan procesos cognitivos (como adaptación, aprendizaje, toma de decisiones, manejo de conocimiento previo, entre otros).

Los principales retos que afronta el despliegue de las redes cognitivas incluyen desde las limitaciones propias de las tecnologías ópticas hasta la complejidad de las redes, heterogeneidad y calidad de servicio. La **complejidad** de la red tiene relación con la cantidad de nodos, medios de transmisión, protocolos soportados, servicios prestados, entre otros. En cuanto al concepto de **heterogeneidad** este se relaciona con las diferentes tecnologías de transmisión que puedan estar involucradas en una red como Internet, igualmente incluye la gran variedad de aplicaciones y protocolos de transmisión soportados por la misma (Chen *et al*. 2008). Una forma de tratar con este aspecto, en busca de una posible solución, consiste en dividir la red en dominios con características funcionales similares, sin embargo cuando se hace tránsito a través de los diferentes dominios definidos, las aplicaciones pueden degradarse en relación con la calidad del servicio ofrecido a los usuarios.

En cuanto al concepto de **Calidad de Servicio** QoS (*Quality of Service*), se busca principalmente que los retardos de transmisión sean bajos y que la disponibilidad del ancho de banda cuente con mecanismos de reserva y control para soportar los requerimientos de Calidad de Servicio de las diferentes aplicaciones de usuarios (Elbiaze 2011). Una solución completa para brindar una QoS cercana a la ofrecida no puede llevarse a cabo en un único nivel de una arquitectura de protocolos, se requiere la participación de la totalidad de los componentes funcionales de la red.

Al respecto, Firoiu *et al*. (2002) brindan una serie de mecanismos para una adecuada QoS en los campos tecnológico y de negocios. Aunque su enfoque es hacia redes inalámbricas, es posible aplicar el estudio realizado a redes alambradas y particularmente a las redes ópticas. Como se observa, desde la perspectiva tecnológica, el concepto de *networking* cognitivo o interconexión de redes cognitivo se visualiza como una evolución hacia la unificación de un ambiente QoS-*aware* en consonancia con diferentes tecnologías disponibles para redes ópticas. Igualmente, la diversidad de configuraciones para las distintas redes de comunicaciones, las tecnologías involucradas y los diferentes requerimientos de los usuarios respecto a las aplicaciones ofrecidas, se convierten en insumos importantes para el desarrollo de las redes cognitivas CN (*Cognitive Networks*).

Asimismo, desde el punto de vista del negocio, las redes cognitivas se conciben con la perspectiva de aumentar las ganancias de las empresas de telecomunicaciones que puedan contar con la posibilidad de desplegar este tipo de alternativas. Entre los posibles beneficios a obtener con esta clase de redes están: empleo de hardware y software que soporte la evolución tecnológica sin la inclusión de grandes cambios, desarrollo de nuevos servicios y aplicaciones, minimizar los procesos de actualización de la infraestructura existente, acelerar la innovación y maximizar el retorno de inversión (control moderado de CAPEX – *CAPital EXpenditures* y OPEX - *OPerational EXpenditures*).

La inclusión de elementos cognitivos en las redes permite a los operadores analizar continuamente la configuración y el desempeño de los diferentes segmentos de red, lo cual puede resultar en una provisión eficiente de los servicios prestados. Los procesos de reconfiguración de la red pueden ser desencadenados por los requerimientos de los servicios, políticas empresariales y planes de facturación y

cobro. De esta forma se puede lograr una mejor interacción entre los operadores de la red y los usuarios finales.

Con las consideraciones y comentarios anteriores se procede en este capítulo a describir el diseño y desarrollo de la propuesta del *Cross Layer* con elementos cognitivos, aspecto que está incluido como requisito en uno de los objetivos de la presente Tesis. Inicialmente y antes de abordar su diseño se precisa contar con la definición de conceptos esenciales como cognición, ciclo cognitivo, redes cognitivas, plano de conocimiento, aprendizaje de máquina entre otros aspectos y además, se precisa la inclusión de los elementos determinantes sobre el origen y definición del concepto de nivel cruzado o *Cross Layer* (como se seguirá denominando en adelante aunque ocasionalmente se empleará la sigla CL), sobre este último ítem se describe su taxonomía o clasificación, funcionalidad, operación y aplicación.

Después de desarrollar los conceptos antes mencionados se procederá a plantear un modelo de arquitectura para QoS sobre OBS, este aporte busca dejar una arquitectura preliminar que permita comprender como se activan los mecanismos de control para QoS en redes por conmutación óptica de ráfagas. Igualmente a través de esta propuesta se pueda visualizar la forma de garantizar calidad de servicio extremo a extremo aun cuando la red pueda estar operando en condiciones de alta carga de tráfico.

En seguida y una vez se hayan estudiado en detalle diferentes arquitecturas cognitivas se realiza un siguiente aporte de una Arquitectura de Red Cognitiva que trata de cubrir algunos faltantes observados en dichas arquitecturas, el objeto de este aporte es permitir a los investigadores contar con una arquitectura que pueda estar más cerca a los requerimientos cognitivos de diferentes clases de tecnologías de red ya que las propuestas existentes plantean opciones de desarrollos de red cognitivas con una alta dependencia del objetivo en particular. Se busca entonces tratar de concebir una arquitectura más abierta.

Posteriormente al final del capítulo se propone un primer modelo de diseño *Cross Layer* con elementos cognitivos como base para el desarrollo de la propuesta denominada **CLTCP/OBS** (*Cross Layer* TCP/IP sobre OBS).

La relevancia de este capítulo radica en principalmente en los diferentes elementos conceptuales que incluye, los cuales no se habían tratado puntualmente en los capítulos anteriores del presente documento de Tesis (Capítulos 1 y 2), cabe anotar que hasta el momento se ha intentado hacer suficiente claridad conceptual sobre las redes ópticas en general y los paradigmas de la conmutación óptica (circuitos, ráfagas y paquetes) aspectos tratados ampliamente en el Capítulo 1, mientras que en el Capítulo 2 se profundiza sobre las redes OBS especialmente en los mecanismos de ensamble de ráfagas y en la solución del problema sobre encaminamiento y asignación de longitud de onda en redes OBS denominado RWA (*Routing and Wavelength Assigment*), dado que dichos procesos son elementos base para el desarrollo de la presente investigación.

En resumen, el presente Capítulo está estructurado de la siguiente manera: se realiza una revisión al estado del arte de los modelos de cognición, redes cognitivas, la calidad de servicio QoS, definición y aplicación del plano de control, plano de conocimiento, diferentes iniciativas de investigación sobre arquitecturas que involucran el concepto de cognición aplicado en redes (inalámbricas y cableadas). La importancia de esta sección radica en el hecho de poder mostrar las diferentes propuestas de arquitecturas cognitivas aplicadas a distintas clases de redes y cómo a partir de esta visión se propone una posible arquitectura adaptada a la red OBS base del presente estudio. Esta sección se concluye con una visión general sobre aprendizaje de máquina y los lenguajes de descripción o especificación cognitivos que son la base para la traducción semántica de los requerimientos de usuario.

Seguidamente se trabaja y desarrolla el concepto de *Cross Layer* así como sus diferentes alternativas de diseño e implementación en sistemas de comunicaciones ópticas. Al final del capítulo se propone un modelo de arquitectura de red que permita analizar primeramente el desempeño de elementos o métodos cognitivos en redes OBS y posiblemente WROBS para luego realizar la interacción con la arquitectura TCP/IP mediante la propuesta de un diseño orientado a *Cross Layer* que involucre ambas tecnologías. Igualmente y debido a que estos conceptos son tratados en una amplia literatura, se recomienda que para ampliar los diferentes ítems relacionados con el origen y definición del plano de control, plano de conocimiento KP (*Knowledge Plane*), aprendizaje de máquina ML (*Machine Learning*), aplicación de ML sobre el plano de control y plano de conocimiento, algunos modelos de redes ópticas

cognitivas y procesos neurológicos sobre tipos de memorias en seres humanos, se deba recurrir a las referencias bibliográficas citadas y en especial a los respectivos Apéndices elaborados por el autor.

Finalmente, cabe destacar que para la obtención de los modelos de desempeño y simulación desarrollados en el Capítulo 4 es necesario considerar otros aspectos que se relacionan con redes de comunicaciones en las cuales se hace una diferenciación a nivel de planos (Plano de Control y Plano de Datos en OBS), distintos modelos de gestión (Gestión OSI, SNMP, TMN principalmente), ciclo cognitivo básico, entre otros, los cuales se constituyen en insumos para completar la propuesta de elementos cognitivos aplicados a redes OBS.

3.2. Cognición

3.2.1. Conceptualización Preliminar

Cognición, del latín *cognoscere* (conocimiento), se emplea en diferentes disciplinas para describir conceptos como conocimiento, inteligencia y aprendizaje. En interconexión de redes o *networking* este término permite, a partir de la complejidad del sistema y la dificultad para la toma de decisiones en determinadas estancias, la posible inclusión de elementos de aprendizaje. Mitola *et al.* (2007) discutieron la posibilidad de adaptar una red (en principio inalámbrica) a las condiciones cambiantes tanto internas como externas mediante la obtención del conocimiento de su entorno a través de procesos de aprendizaje no supervisados.

De otro lado, la aparición de tecnologías de transmisión de muy alta velocidad brinda la opción de contar con grandes anchos de banda especialmente para nuevas aplicaciones de carácter multimedia. Igualmente, los operadores de servicios e infraestructuras de telecomunicaciones buscan contar con redes que permitan controlar el ancho de banda requerido de acuerdo con las aplicaciones soportadas, lo que contribuiría a que la red esté ajustada en costos y sea versátil en su operación.

En la actualidad, existen redes que operan normalmente a 10Gbps y que gradualmente pueden acomodarse (migrar) a soluciones heterogéneas que están

compuestas por mezcla de tráfico a 10, 40 y 100Gbps. A esta nueva solución se la conoce como Mezcla de velocidades de línea MLR (*Mixed Line-Rate*), la cual es opuesta a la solución tradicional conocida como SLR (*Single Line-Rate*). Sin embargo, contar con MLR no es suficiente ya que se requiere además que la red sea flexible, sintonizable, elástica o adaptativa acorde con las variaciones del tráfico presentes, dicha flexibilidad implica que la red pueda ajustar dinámicamente sus recursos de forma óptima y acorde con las metas extremo a extremo[24] definidas.

Revisando la literatura al respecto se encuentran soluciones que permiten a nivel físico una provisión del espectro con mejoras en su eficiencia, entre estas soluciones se mencionan las técnicas de transmisión multi-portadoras (OFDM) y WDM Nyquist (V-WDM) que permiten sintonizar la red de acuerdo con la solicitud de ancho de banda y seleccionar el formato de modulación más adecuado al requerimiento. Así, un par de nodos pueden ser conectados con la cantidad de ancho de banda requerida (ajustada al requerimiento) y proveer ya sea servicio de sub portadora óptica o conectividad súper canal. Para un mejor detalle en la ampliación sobre estos conceptos se recomienda revisar el trabajo desarrollado por Jansen (2012).

Muchos autores coinciden en indicar que los modelos de control empleados en las redes actuales resultan en altos costos de operación OPEX y de capital CAPEX, baja flexibilidad en el desarrollo de servicios, baja disponibilidad de la red, bloqueo de recursos e intervalos de recuperación largos (entre otros aspectos).

De otro lado, los cambios que se realizan en las redes son en su mayoría reactivos (después de la ocurrencia de los problemas). Esto sucede principalmente porque las redes no poseen las características que les permitan "ser conscientes[25]" de su estado, ni de las metas que debe alcanzar en su operación. Con el objetivo de cubrir estas limitaciones y lograr que las redes lleguen a ser más dinámicas, autónomas y proactivas se busca incorporar el concepto de inteligencia (cognición) especialmente

[24] Metas extremo a extremo se refiere a la frase en inglés *end to end goals*, presente tanto en las instancias de QoS como en la mayor parte de los modelos cognitivos estudiados, esta clase de metas pueden estar definidas por acuerdos a nivel de servicio entre clientes y proveedores de servicios (nota del autor).

[25] Este grado de consciencia se refiere principalmente a tener un control sobre lo que sucede en la red y en el entorno y no con la definición de consciencia en el ser humano, aunque la idea es adquirir su funcionalidad al menos a largo plazo (nota del autor).

en los sistemas de gestión y control de red. Asimismo, en las redes actuales se requiere la introducción del concepto de Calidad de Transmisión o QoT (*Quality of Transmission*) lo cual implica tener un conocimiento completo de los diferentes parámetros físicos que están involucrados en un proceso de comunicación.

De otro lado, los modernos paradigmas sobre redes heterogéneas muestran como al introducir nuevas flexibilidades (cognición por ejemplo), estas pueden volver más compleja la operación de la red. Sin embargo, en este contexto es posible que ante determinada demanda de tráfico las facilidades de gestión de la red puedan seleccionar la ruta, el canal, la velocidad de bit y el formato de modulación adecuado (Gerstel *et al.* 2012). En estos casos las acciones básicas como el enrutamiento y asignación de longitud de onda RWA (*Routing and Wavelength Assignment*) se pueden reemplazar por problemas de enrutamiento, nivel de modulación y asignación de espectro RMLSA (*Routing, Modulation Level and Spectrum Allocation*) donde a cada requerimiento de conexión se le asigna una fracción del espectro, aspecto que puede aplicarse a todo tipo de redes tanto alambradas, inalámbricas como ópticas, en estas últimas se proponen modelos para transferencia más allá de 100Gbps (Jinno *et al.* 2009).

Como puede inferirse, el empleo de técnicas cognitivas particularmente en redes ópticas permite introducir un nivel de inteligencia (o extender un plano de control existente) o también ampliar el concepto de inteligencia en principio al nivel óptico facilitando sintonizar diferentes características del nivel físico como el formato de modulación empleado, empleo de FEC (*Forward Error Correction*), la capacidad de longitud de onda, entre otros y algunos parámetros del nivel red como ancho de banda, numero de caminos de luz o *lightpaths* simultáneos, calidad de servicio QoS dependiendo de la aplicación soportada o de los requerimientos del servicio y las metas extremo a extremo propuestas y definidas por los operadores.

Como se había introducido anteriormente y debido a la importancia del concepto de Calidad de Servicio y su influencia en la definición de arquitecturas de red cognitivas, enseguida se hace una breve referencia al mismo y se revisa cómo este concepto puede influenciar el desarrollo de métodos o procesos cognitivos en diferentes clases de redes.

3.2.2. Relación entre Calidad de Servicio y Cognición

El concepto de Calidad de Servicio o QoS (*Quality of Service*), aunque cuenta con una gran variedad de definiciones (según IETF RFC 2386, ITU-T E.800, entre otros organismos de estandarización), se puede afirmar que consta de un conjunto de estándares y mecanismos que buscan asegurar un desempeño de alta calidad al soportar aplicaciones críticas. Conceptos como ancho de banda, retardo, *jitter* (variación del retardo), empleo de recursos y reducción en la pérdida de datos tienen que ver directamente con la QoS.

En otras palabras la QoS permite proveer diferentes prioridades para diferentes servicios, aplicaciones, usuarios o flujos de datos (estos aspectos pueden no requerirse si no se presenta congestión en la red). Como se muestra en Romero (2010) la QoS tiene aplicación directa dependiendo si el tráfico es elástico o no elástico, en el primero el tráfico se adapta a las variaciones de retardo y rendimientos de la red, mientras que el segundo no se adapta a estas condiciones y por lo tanto necesita optimizar: rendimiento, retardo, *jitter* (fluctuación del retardo) y pérdida de paquetes. La figura 3.1 muestra una gráfica donde se puede apreciar la relación temporal entre la llegada de datagramas IP y los parámetros asociados con la QoS, mostrando además la probabilidad de pérdida información.

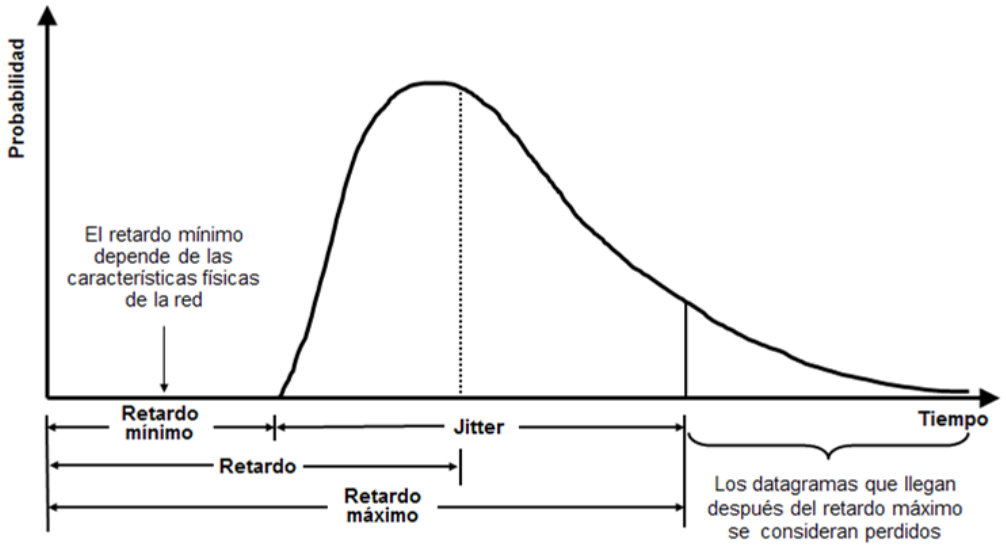


Figura 3.1. Relación entre parámetros de la QoS respecto al envío de datagramas IP

La QoS se puede mejorar con técnicas de conformado de tráfico mediante asignación de prioridades a los paquetes (de envío y descarte), clasificación de las aplicaciones y el empleo de colas en los puntos donde pueda presentarse congestión. Para el caso puntual del diseño al final del presente capítulo se considera una red OBS que maneja diferentes prioridades como elemento que caracteriza el envío del trafico IP a través de la misma. La figura 3.2 muestra el conjunto de conceptos asociados con calidad de servicio, acorde con los elementos antes mencionados y según la visión de Cisco ™.

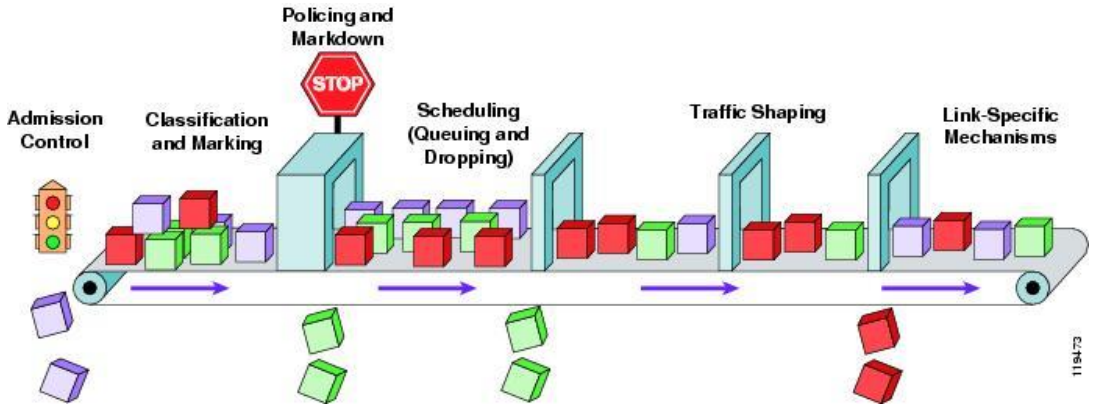


Figura 3.2. Elementos asociados con QoS (www.cisco.com)

Entonces, un adecuado control de los parámetros que definen la QoS en una red garantiza en gran medida un desempeño adecuado de la misma acorde con los más altos niveles de calidad requeridos en la prestación de un servicio. Este aspecto permite encontrar una estrecha relación entre los objetivos o metas extremo a extremo a lograr cuando se introduce la funcionalidad de las redes cognitivas como una opción para mejorar el desempeño de la red (red óptica en este caso) y la intención de proveer QoS en esta clase de redes en particular. Así que para obtener un modelo cognitivo acorde con los requerimientos de red es necesario en primer lugar definir las metas y objetivos para los servicios y aplicaciones soportadas para posteriormente adecuar la QoS a esas metas y es aquí donde se puede definir un método cognitivo que ayude a optimizar el desempeño de la red para lograr dichas metas.

Una vez revisado de forma general el concepto de QoS, se destaca el hecho que las redes tradicionales (redes heredadas o *legacy*) no pueden percibir las demandas de

los servicios que solicitan los usuarios finales y por lo tanto tampoco pueden cambiar dinámicamente las características de QoS de acuerdo con las variaciones que puedan ocurrir en los entornos interno y externo de la red.

Para el caso de las redes por conmutación de paquetes IP se han definido dos aproximaciones al concepto de QoS, el primero en un sistema soportado en parámetros y basado en el intercambio de requerimientos de las aplicaciones con la red y el segundo en un sistema con prioridades donde cada paquete identifica un nivel de servicio deseado, en particular se trata de los conceptos de:

- Servicios Integrados ***IntServ*** (*Integrated Services*) definido en el RFC 1633 en 1994, en este modelo se emplea el protocolo de reserva de recursos tradicional RSVP (*Resource Reservation Protocol*) para solicitar y reservar recursos a través de la red. En otras palabras, el usuario solicita de antemano los recursos que necesita, cada nodo (enrutador, por ejemplo) del trayecto debe tomar nota y efectuar la reserva solicitada (modelo carril bus).

- Servicios Diferenciados ***DiffServ*** (*Differentiated Services*) definido en el RFC 2475 en 1998, en cual se implementa un modelo por prioridades, en este caso se marcan los paquetes de acuerdo al tipo de servicio deseado, en respuesta a esto, los elementos de red (enrutadores y conmutadores) emplean diferentes estrategias de encolamiento para cumplir con las expectativas del servicio. El campo Tipo de Servicio o ToS (*Type of Service*) particularmente el Byte DS del encabezamiento del datagrama IPv4 es empleado para colocar los códigos de los servicios en los paquetes IP. A este modelo se le llama modelo ambulancia.

Como se observa, los parámetros que forman parte de la QoS influyen directamente en el desempeño de las diferentes redes de comunicaciones, de otro lado los elementos cognitivos pueden ayudar a mejorar el desempeño de la red en cuanto realizan funciones autónomas con ciertas capacidades de aprendizaje y de aplicar conocimientos aprendidos para lograr las metas extremo a extremo definidas. Se evidencia entonces una posible y estrecha relación entre el concepto de cognición y la QoS lo cual permite elaborar propuestas de métodos cognitivos que en definitiva pueden mejorar el desempeño de la red de comunicaciones.

Finalmente, para complementar el concepto de Cognición y su extensión hacia redes cognitivas, en seguida se amplían algunos elementos conceptuales que tienen una estrecha relación con la evolución experimentada por el concepto de Cognición y los distintos proyectos e iniciativas de investigación que se han desarrollado al respecto.

3.2.3. Fundamentos de las Redes Cognitivas

El desarrollo del concepto de redes cognitivas ha tomado un gran auge desde hace unos años, sin embargo para obtener un modelo o arquitectura cognitiva ha sido necesario recorrer un largo camino partiendo del análisis que diferentes autores han realizado desde Newell & Simon (1973) con el desarrollo del concepto de Inteligencia Artificial AI (*Artificial Intelligence*), luego aparecen una serie de autores entre ellos Restak (2005) donde se propone trabajar el concepto de sicología cognitiva[26], igualmente otros investigadores llevan estos conceptos al plano de las redes de comunicaciones. Un ejemplo de esto se muestra en el trabajo desarrollado por Clark *et al.* (2003) de MIT[27] donde proponen la introducción de un **plano de conocimiento** KP (*Knowledge Plane*) en una red con la inclusión de **técnicas cognitivas** tales como la representación de la información, el aprendizaje y razonamiento de tal manera que le permitan a este plano estar “pendiente” de la red como un todo y de las diferentes acciones realizadas por la misma.

Este plano de conocimiento tiene la habilidad de observar desde diferentes puntos de vista la operación de una red (visión holística) y emplear una aproximación unificada para resolver problemas evitando soluciones particulares que puedan conducir a procesos de sub optimización de la red. Además es capaz de operar en un ambiente dinámico siguiendo las metas propuestas en los niveles altos de la arquitectura.

Al intentar introducir conceptos como aprendizaje y toma de decisiones en sistemas de comunicaciones es necesario realizar estudios previos sobre el comportamiento humano y lo que permite que éste sea consciente de su entorno y como se adapta al mismo, debido a esto en la presente sección se incluyen conceptos como proceso cognitivo, Ciclo Cognitivo y posteriormente la forma como se comporta el sistema de

[26] Entendiendo sicología cognitiva como el estudio de procesos mentales como atención, uso del lenguaje, memoria, percepción, creatividad, meta cognición y pensamiento (nota del autor).
[27] MIT *Massachussets institute of Technology* (http://web.mit.edu/).

memoria en los seres humanos, de cada uno de ellos se toman elementos para construir arquitecturas de red cognitivas.

- **Proceso Cognitivo (Método Cognitivo)**

Es considerado el corazón de una red cognitiva y consiste en un algoritmo responsable de realizar funciones de razonar, aprender y planear para lo cual se soporta en una diversidad de mecanismos tomados de la inteligencia artificial, aunque en el contexto de esta Tesis, se prefiere que el proceso cognitivo sea un algoritmo distribuido y que pueda ejecutarse en cada nodo de la red OBS.

Según DaSilva & MacKenzie (2007) el proceso de razonamiento es inmediato en la toma de decisiones para seleccionar una acción o un conjunto de acciones, igualmente, emplea el conocimiento histórico y el conocimiento actual (condiciones de la red, preferencia de los usuarios y políticas). Según los mismos autores, el proceso de aprendizaje es considerado como una acción a largo plazo que acumula conocimiento basado en resultados pasados y con ello se busca que el aprendizaje mejore los razonamientos futuros, en algunos casos aprendizaje y razonamiento van unidos. A estos elementos se une el concepto de planeación definida como una secuencia estratégica de acciones para lograr una meta.

Entonces, un método cognitivo o proceso cognitivo puede ser “implantado” en el nodo de una red OBS y a través de los elementos cognitivos que posea y la posibilidad de realizar cambios tanto estructurales como de funcionamiento en dicho nodo, pueda contribuir a lograr algún tipo de mejora en el desempeño no solo del nodo sino de toda la red OBS[28].

- **Arquitecturas de cognición o Arquitecturas Cognitivas**

Existen diferentes modelos con los cuales se puede realizar una clasificación de las arquitecturas cognitivas, en primera instancia existen las arquitecturas avanzadas las cuales se basan principalmente en la teoría unificada de la cognición y también se

[28] Se recuerda que aunque se haga explícito en trabajo con redes OBS estos razonamientos pueden ser aplicados a otras clases de redes (nota del autor).

cuenta con otros modelos de naturaleza más básica. La figura 3.3 muestra según Amanna & Reed (2010) como sería esta clasificación.

El caso de los modelos OODA (*Observe-Orient-Decide-Act*) y CECA (*Critique-Explore-Compare-Adapt*) corresponden a propuestas que se han desarrollado en la fuerza aérea de Estados Unidos como mecanismos a seguir (reacción) cuando se está en combate. Aunque aparentan cierta simplicidad su aplicación y desarrollo ajustado a los requerimientos pueden convertirlos en opciones a considerar al momento de realizar desarrollos.

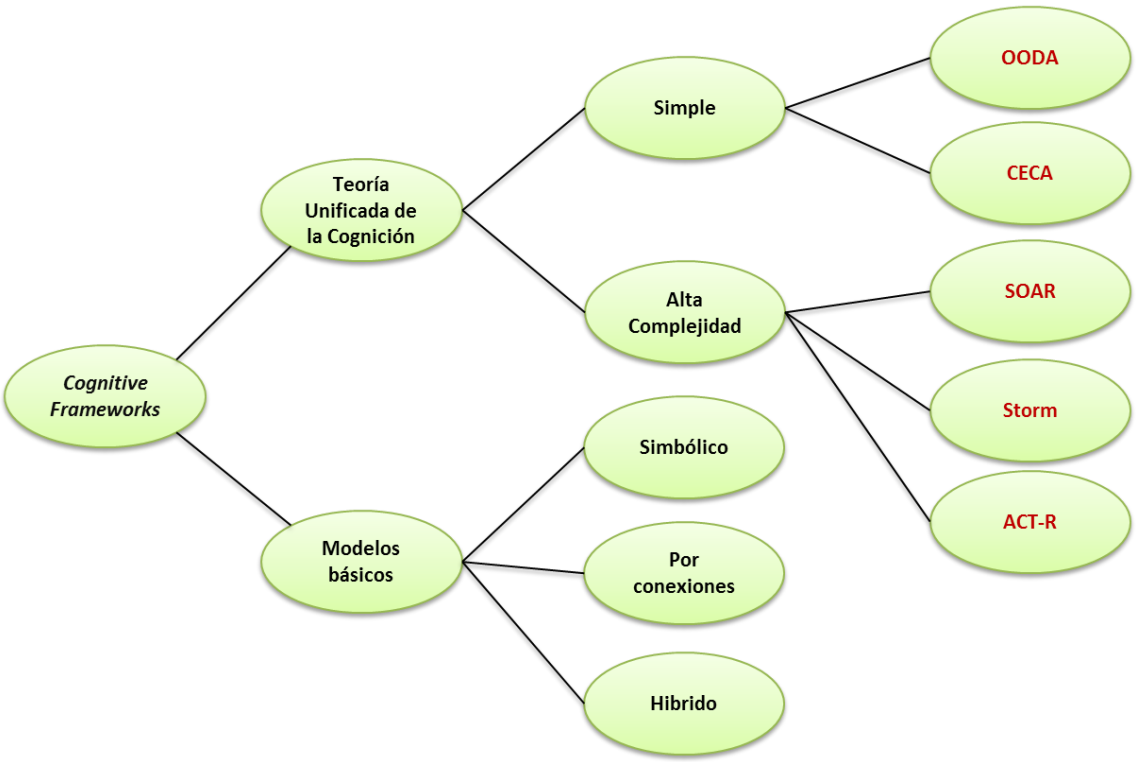


Figura 3.3. Clasificación de las arquitecturas cognitivas (Amanna & Reed 2010)

De los modelos incluidos en la figura 3.3 y considerados de alta complejidad se destaca el ACT-R (*Adaptive Control of Thught - Rational*) propuesto por Robert Anderson como uno de los más importantes (figura 3.4), este modelo combina elementos que permiten identificar las funciones de cognición humana a través de módulos perceptuales y módulos de memoria. Dicho modelo se ve influenciado por otros predecesores como Soar (Newell 1973), EPIC (*Executive Process Interactive Control*) propuesta por Kieras & Meyer (1997), CLARION (*Connectionist Learning*

with Adaptive Rule Induction ON-line) propuesta por Sun (2002; 2003). Su implementación se hace en el lenguaje LISP (*LISt Processing*) y permite realizar tareas que pueden implicar razonamientos complejos, según este modelo el conocimiento humano tiene dos representaciones, la declarativa y la procedimental (Pirolli & Card 1999).

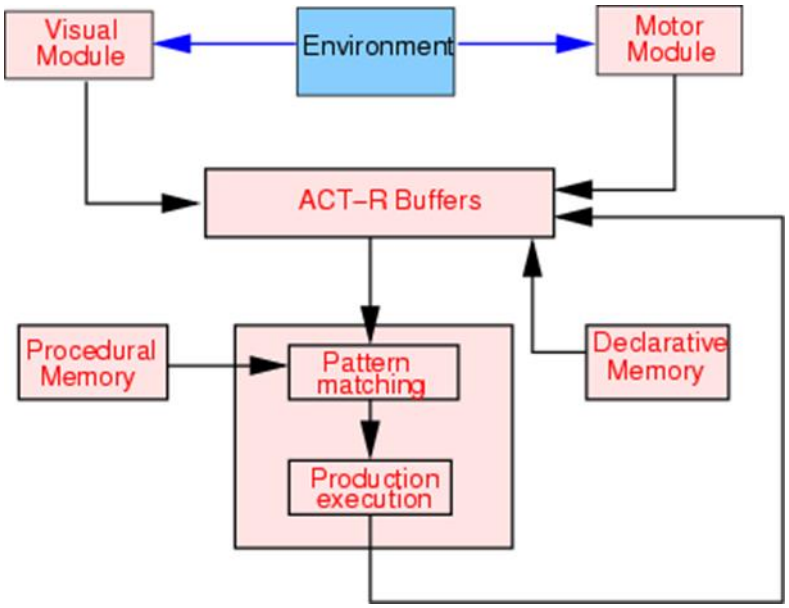


Figura 3.4. Diagrama en bloques del modelo ACT-R de Anderson

Además de esto modelos, existe una amplia variedad de propuestas de arquitecturas que tratan de mostrar mediante bloques e interacción entre los mismos los diferentes procedimientos empleados por los seres humanos al momento de realizar procesos cognitivos en la vida diaria. Y pensando en cómo pueden ser las arquitecturas del futuro, Sun (2002) propone que para el desarrollo de las mismas se deba tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Realismo ecológico.
- Realismo bio-evolutivo.
- Realismo cognitivo.
- Escepticismo sobre las metodologías propuestas.

Aunque este campo de la sicología cognitiva es muy amplio, se han adelantado una serie de investigaciones que buscan aplicar estos conceptos principalmente a la

robotica, por mencionar un ejemplo se trata del proyecto CogBot propuesto por Goertzel, Arel & Pennachin (2009) que busca emular la inteligencia de un niño en edad temprana en un robot humanoide.

Sin pretender emular estos desarrollos se busca obtener unas bases suficientes que permitan a partir de un estudio en detalle de estas arquitecturas, plantear un modelo básico sobre cómo incorporar el comportamiento cognitivo de una red de comunicación óptica.

- **Ciclo Cognitivo**

Desde su creación, el empleo del concepto de cognición aplicado a las redes de comunicaciones ha tenido mayor auge en investigación y desarrollo en el entorno de las redes inalámbricas (Mitola III & Maguire 1999), en estas redes el concepto se ha convertido en un paradigma de la comunicación inalámbrica en la cual tanto las redes como los mismos nodos inalámbricos cambian sus parámetros particulares de transmisión o de recepción para lograr un desempeño eficiente sin interferir con los usuarios autorizados. Esta variación o alteración de parámetros está basada en la observación de varios factores del entorno interno y externo de la radio cognitiva tales como el espectro de radiofrecuencia, el comportamiento del usuario o el estado de la red en general. De otro lado se espera que el denominado radio cognitivo, en el cual se ha obtenido un alto grado de madurez en la actualidad, pueda ser el soporte para el estándar inalámbrico de quinta generación (5G).

La importancia del modelo desarrollado por Mitola para redes inalámbricas radica en la introducción del concepto de **Ciclo Cognitivo, Ciclo de Cognición** o también denominado **Lazo Cognitivo** el cual consta de seis (6) procesos o estados bien definidos a saber: observación, orientación, planeación, aprendizaje, toma de decisiones y acción (Mahmoud 2007, p. 204). Mitola en su propuesta considera un entorno local a nivel de elemento de red y básicamente aplica el concepto de ciclo cognitivo sobre los niveles MAC y físico dentro del modelo OSI (*Open System Inerconnection*).

La figura 3.5 muestra mediante el uso de un diagrama de transición de estados STD (*State Transition Diagram*) las diferentes interacciones entre los componentes del

Ciclo Cognitivo. Para el desarrollo de este ciclo se parte del modelo de unificación de las diferentes teorías cognitivas propuestas. Newell *et al.* (1985), en uno de sus trabajos explican la reacción de los organismos inteligentes ante estímulos provenientes del entorno, el comportamiento que asumen a partir de esos estímulos, la definición racional de metas y acciones a seguir, así como la representación del conocimiento y el aprendizaje, lo cual es realizado por la mente como un aspecto unificado.

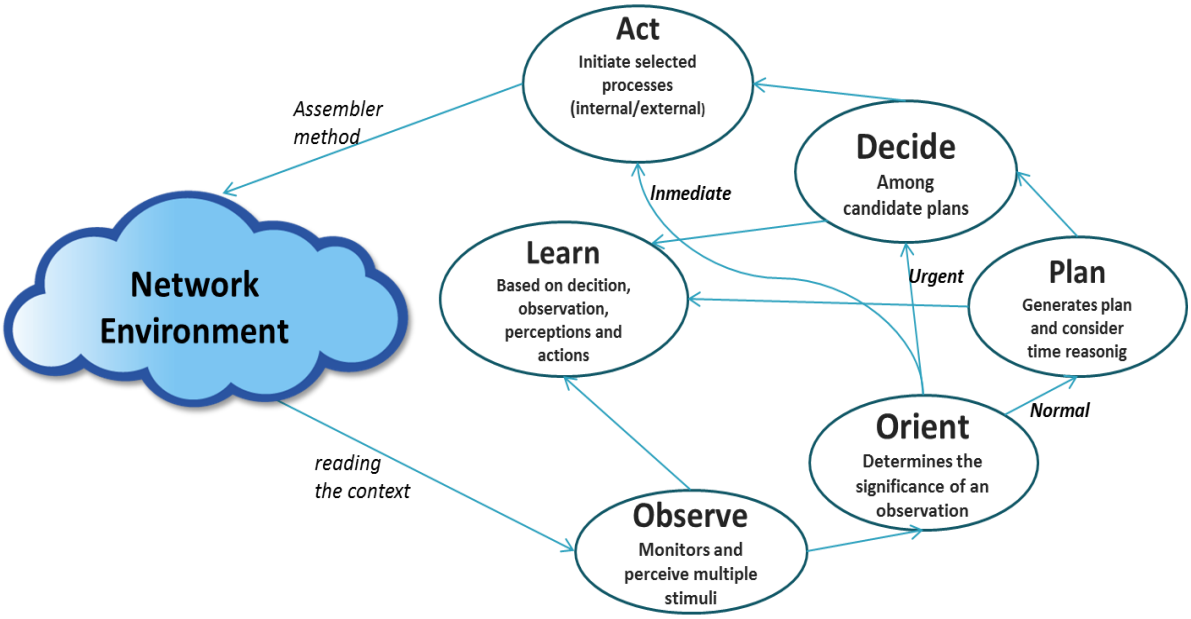


Figura 3.5. Ciclo cognitivo representado mediante STD (modificado a partir de Mahmoud 2007, p. 207)

DaSilva & MacKenzie (2007) consideran que un sistema cognitivo puede realizar algunas acciones del ciclo cognitivo las cuales forman parte de una red reconfigurable (incluyendo observación y acción) mientras el resto de funciones (orientación, planeación, toma de decisiones y aprendizaje) pueden constituir el denominado “motor cognitivo” CE (*Cognitive Engine*). Con estos elementos es posible crear un nodo de red reconfigurable que puede ser tomado como base o plataforma para la construcción de una red cognitiva.

La figura 3.6 se muestra el modelo de ciclo cognitivo adaptado por Mitola para su propuesta sobre redes cognitivas, se observa la especificación de funciones y la creación de estados nuevos que inciden directamente en el proceso de aprendizaje del sistema.

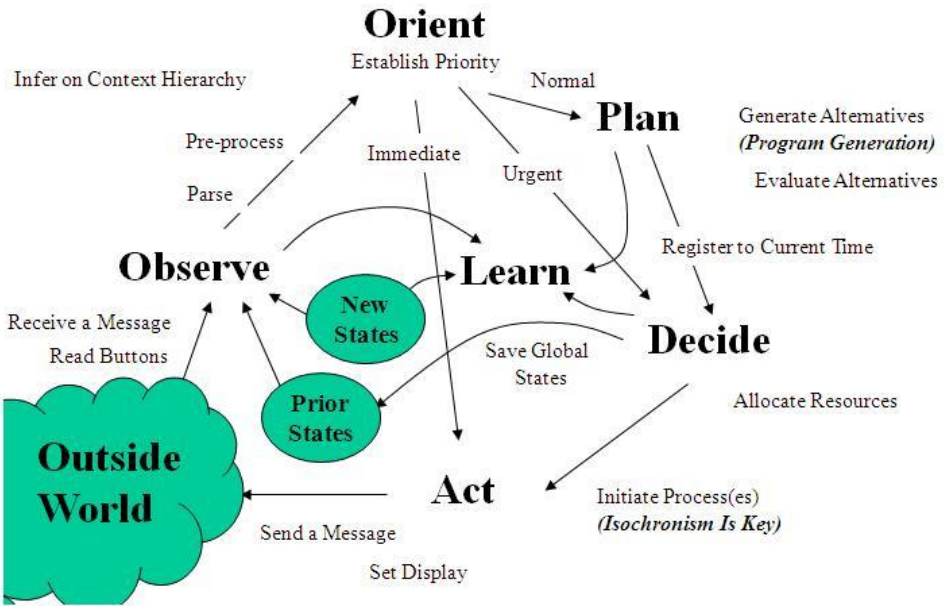


Figura 3.6. Modelo de ciclo cognitivo propuesto por Mitola (2000)

Como se recuerda, el concepto de radio cognitivo se ha generalizado hacia Redes Cognitivas (DaSilva & MacKenzie 2007), igualmente, diferentes autores para desarrollar sus propuestas sobre el tema parten de la definición del Plano de Conocimiento hecha por Clark *et al.* (2003). Debido a la importancia de estos conceptos y a su gran influencia en el desarrollo de diferentes arquitecturas cognitivas en secciones siguientes se hará un estudio con mayor detalle sobre ellos.

Con estos conceptos y sumando otros que se estudian en seguida, se comprende mejor el por qué el paradigma de las redes cognitiva se ha convertido en un área de investigación de gran auge en la actualidad.

- **Ciclo OODA**

Uno de los primeros modelos de ciclos cognitivos, es el propuesto por Boyd conocido como ciclo OODA (*Observe, Orient, Decide and Act*) mostrado en la figura 3.7, el cual es tomado como ejemplo por Thomas y Mitola, aunque este modelo omite el proceso de aprendizaje en sí, ha sido adaptado y aceptado como punto de partida para una serie de estudios e investigación de donde surgen diferentes estructuras que involucran el concepto de lo cognitivo en distintos entornos.

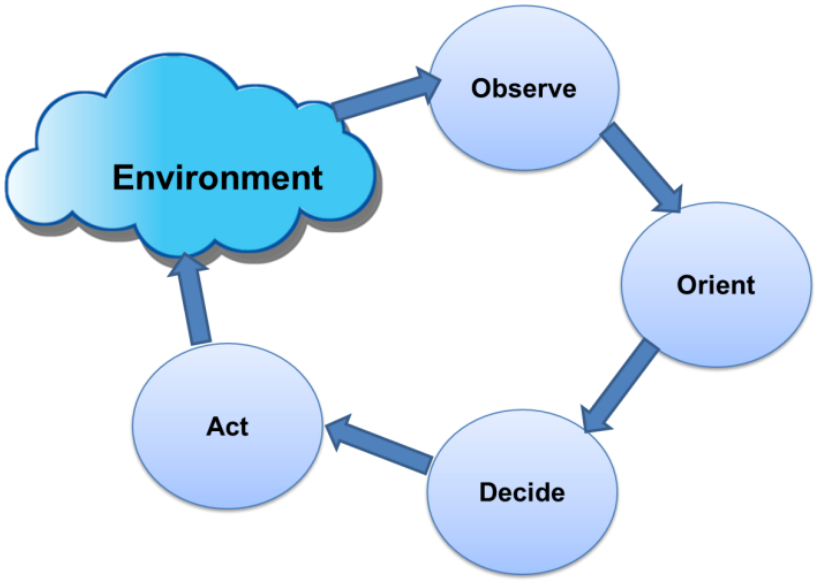


Figura 3.7. Modelo OODA propuesto por Boyd

Como se había mencionado con anterioridad, el modelo OODA fue definido para entrenamiento militar en la fuerza aérea de los Estados Unidos, propuesto por el coronel John Boyd, la importancia de este modelo es que coloca elementos esenciales en estados bien definidos. Estos estados son: **Observación**, corresponde a la recolección de datos por medio de los sentidos, **Orientación**, como resultado del análisis y síntesis de los datos se construye una perspectiva mental del entorno real, **Decisión**, corresponde a la determinación del curso de una acción basado en una perspectiva mental de la realidad y **Acción**, que corresponde a la ejecución física de las decisiones.

Tanto el Ciclo Cognitivo como el ciclo OODA resultan esenciales en el desarrollo del concepto de cognición aplicable a redes de comunicaciones, de ellos se puede extraer aspectos de comportamiento y entrenamiento propios de los seres vivos y emplearlos para construir motores de cognición que impulsen el desarrollo de modelos desempeño en diferentes sistemas de redes de comunicaciones.

- **Tipos y Métodos de razonamiento**

Para realizar sus diferentes tareas en el campo cognitivo, la red a través del desarrollo del ciclo cognitivo debe considerar una serie de tipos y métodos de

razonamiento los cuales son clasificados por diferentes autores entre ellos Gavrilovska *et al.* (2011), de cuyos resultados se elabora un resumen mostrado en la tabla 3.1 donde se da una primera clasificación de los tipos de razonamiento empleado en las redes cognitivas.

Tipo de razonamiento	**Explicación**
Proactivo	Toma acciones solo cuando existe una indicación de un problema; este tipo es empleado donde las limitaciones temporales son más relajadas.
Reactivo	Prepara una serie de acciones con base en necesidades que requieren una acción inmediata, es más empleado en entornos dinámicos.
Inductivo	Formas de hipótesis que se formulan dependiendo de ciertos patrones detectados (usados en radio cognitiva)
Deductivo	Traza conclusiones basados en conexiones lógicas
Disparo	Selecciona una acción final basada en información disponible inmediatamente
Secuencial	Selecciona acciones intermedias y observa la respuesta del sistema siguiendo cada acción
Centralizado	Alto grado de relación entre las entradas (acciones) y las salidas (observaciones)
Distribuido	Bajo grado de relación entre entradas y salidas

Tabla 3.1. Clasificación de tipos de razonamiento empleado en redes cognitivas

Además de lo consignado en la tabla 3.1, algunos autores hacen alusión a los Métodos de razonamiento hablando en principio de Métodos de razonamiento distribuido con restricciones, métodos de redes bayesianas[29] (considerando entradas, estados y salidas de un sistema), heurísticas y meta heurísticas (empleadas en problemas que resultan NP-*hard*).

En principio las Metaheurísticas son vistas como un marco general algorítmico que se puede aplicar a diferentes problemas de optimización con mínimos cambios para ser adaptada a un problema específico (técnicas aproximadas), igualmente se extiende el concepto a las Metaheurísticas paralelas donde se combina la búsqueda

[29] También denominadas red de creencia, modelo de Bayes o modelo probabilístico expresado mediante un grafo acíclico dirigido DAG (*Directed Acyclic Graph*) formado por un conjunto d variables aleatorias y sus dependencias condicionales (nota del autor).

simple con altos niveles de estrategia. Otros son llamados algoritmos aproximados (como por ejemplo AG y búsqueda Tabú). Una explicación en detalle sobre estos conceptos, se encuentran en DaSilva & MacKenzie (2007) y Talbi (2009), los primeros hacen una disertación extensa explicando cómo ampliar el concepto de redes radio cognitiva hacia redes cognitivas, define los elementos esenciales de una red cognitiva (sensores, actuadores, motor cognitivo, políticas), en el caso de Talbi, realiza una explicación muy completa de las diferentes Metaheuristicas abordadas por los investigadores en la actualidad.

En este orden de ideas, se observa como de la combinación de los tipos y métodos de razonamiento surgen algunos ejemplos de razonamientos específicos entre los que se cuentan: razonamiento basado en casos o CBR (*Case-Based Reasonig*) que consiste en la combinación de razonamiento y aprendizaje; razonamiento por descomposición de un objetivo en sub objetivos o subsumir la solución); razonamiento por lógica difusa FLR (*Fuzzy Logic Reasoning*) que permite el empleo de valores intermedios definidos entre los tradicionales verdadero/falso, si/no, alto/bajo. Esta última es una técnica muy empleada en telecomunicaciones (enrutamiento por QoS, por ejemplo). Igualmente, mediante el mapeo con FL (*Fuzzy Logic*) es posible manejar *Cross-Layering* y emplear esta información en la funcionalidad del ciclo cognitivo. Finalmente también se incluye el razonamiento relacional, el cual emplea la noción de similitud, siendo este un aspecto importante en la construcción de las ciencias del conocimiento (Facchini & Granelli 2009; 2010). Al tomar en cuenta estos elementos en el diseño propuesto, se considera que los procesos son distribuidos tanto en razonamiento como en aprendizaje.

Juntando los elementos antes mencionados y procediendo a su aplicación en redes de comunicaciones, surgen los conceptos de radio cognitivo y redes cognitivas como se plantea en Mitola (2006), la diferencia de enfoque entre radio cognitivo y redes cognitivas radica principalmente en el ámbito de aplicación, mientras que el primero se centra en el nivel físico principalmente (y en algunas ocasiones en nivel enlace), en las redes cognitivas los procesos de optimización del desempeño de una red pueden estar distribuidos en los diferentes niveles de la pila de protocolos (arquitectura OSI de ISO o según la IETF) y entre diferentes redes donde se puede requerir la búsqueda de optimización para alcanzar las metas extremo a extremo definidas.

- **Redes Cognitivas CN**

En la actualidad se cuenta con diferentes definiciones de lo que son las redes cognitivas CN (*Cognitive Networks*) en comunicaciones, como ejemplos preliminares se puede mencionar a Kantor (1998) quien se considera como uno de los primeros que introdujo el termino como tal considerando que una red cognitiva era una red con memoria, Ramming (2004) donde se muestra que esta clase de redes son aquellas que pueden tomar decisiones respecto a procesos de configuración de ella misma siguiendo una misión específica en un entorno particular, igualmente, Sifalakis & Hutchison (2005) definen que además de la red ser auto adaptable en respuesta a condiciones presentes, su actuar se basa en razonamientos sobre conocimientos adquiridos previamente, aunque el propósito de crear un nivel cognitivo en su modelo no tuvo la acogida ni el éxito esperado, sus ideas sobre manejo de conocimiento adquirido se sigue considerando en otras propuestas.

Como se recuerda, según su concepción, una red cognitiva CN es capaz de percibir las condiciones actuales del entorno, planificar, decidir y actuar sobre esas condiciones, teniendo la opción de aprender de los sucedido y actuado mientras sigue unas directrices de desempeño establecidas previamente, para ello hace uso del concepto de ciclo cognitivo, aunque algunos autores consideran que este concepto no menciona directamente en conocimiento de la red (Balamuralidhar & Prasad 2008) lo cual se evidencia ya que no se menciona la inclusión de por ejemplo una base de información de conocimiento o alguna forma de almacenar la experiencias para que luego puedan ser usadas en la toma de decisiones. Debido a lo anteriore, se está intentando introducir nuevos aspectos más allá de un plano de conocimiento y de la descripción del ciclo cognitivo, en Fortuna & Mohorcic (2009) se hace un recuento de los diferentes esquemas propuestos, se trata de la introducción del concepto de *Cross Layer* y su relación con las redes cognitivas.

En este orden de ideas, el principal objetivo de las redes cognitivas es incrementar la eficiencia de la red y su desempeño, para ello es importante la definición del concepto de metas extremo a extremo que se trazan por parte de los diseñadores y operadores de la red. Igualmente, una red adquiere el calificativo de Cognitiva cuando los diferentes elementos que la constituyen pasan de ser configurados estáticamente a ser reemplazados por componentes que pueden realizar ajustes

autónomamente y tener “conciencia” de su estado. Se considera que mientras un sistema de red requiera de la intervención humana para realizar su configuración y cuidar de la misma no puede considerarse cognitiva, se requiere que la red pueda encontrar por sí misma la forma óptima para conectar sus dispositivos y ajustar los parámetros de la red para lograr el mejor desempeño en la transferencia de información, se incluye el hecho que la red pueda optimizarse ante la posible ocurrencia de eventos futuros, para ello se considera que la red conoce el estado de cada nodo con lo cual puede prevenir por ejemplo que se presente congestión en los mismos.

Para el caso del comportamiento del protocolo TCP, el cual es objeto del estudio en esta Tesis, este protocolo está equipado con un mecanismo para el control de congestión el cual reduce la velocidad de transferencia ante la pérdida de paquetes, si se tuviera conocimiento del estado de la red antes de enviar los paquetes, se podría controlar la velocidad de envío desde antes y así poder evitar la pérdida de información o evitar que se activen los mecanismos de control lo cual puede conducir a la operación equivocada de la red de paquetes IP. En este caso se requiere además de un *networking* cognitivo (interconexión de redes cognitivas) para brindar un desempeño óptimo extremo a extremo (cuando se establece una sesión entre un cliente local y un servidor remoto).

Por tratarse de una temática en constante evolución, existen diferentes definiciones y distintas ideas de cómo desarrollar el *networking* cognitivo como una extensión de la red cognitiva más allá de su entorno. Thomas, DaSilva & MacKenzie (2006) definen una red cognitiva como “aquella red que contiene procesos cognitivos a través de los cuales se puede percibir las condiciones actuales de la misma, y a partir de aquí puede proceder a planear, decidir y actuar sobres dichas condiciones. La red cognitiva puede aprender de estas adaptaciones y usarlas para la toma de futuras decisiones, a la vez que se busca alcanzar los diferentes objetivos de desempeño extremo a extremo”. Por su parte, Li *et al.* (2012) la define como una red inteligente que en esencia consiste en una red programable acompañada de un plano de cognición. Dicho plano de cognición recoge las condiciones de la red, razona, aprende y emite juicios al respecto, y finalmente adapta la red programable con base en los objetivos extremo a extremo.

De lo dicho hasta el momento, el plano de cognición es considerado actualmente como el mejor candidato para lograr que los nodos estén al tanto del estado (o estatus) de la red. Igualmente, la red programable puede estar controlada y ajustada por software. Se propone el empleo de elementos sensores (observadores) para recolectar la información de la red y enviarla a dicho plano de cognición, al interior de cada nodo los diferentes niveles donde se ubican los protocolos cuentan con pequeñas interfaces hacia el plano de cognición para manejo de los datos del sensor (información recogida y por recoger). El plano de cognición recoge las condiciones de la red, realiza análisis y decide cómo adaptar la red. Por su parte los actuadores son empleados para reprogramar la red usando las decisiones tomadas por el plano de cognición (Rousu 2013). La figura 3.8 muestra una gráfica que recoge la mayoría de conceptos expresados sobre redes cognitivas y emplea el modelo en capas asociado a la suite TCP/IP. Se destaca la importancia de los nodos cognitivos, su estructura según su ubicación (acceso o *core*) y la posible interconexión de los mismos, igualmente la ubicación del *Cross Layer* y la cobertura de las metas extremo a extremo y como estas influyen el desempeño global de todo el sistema.

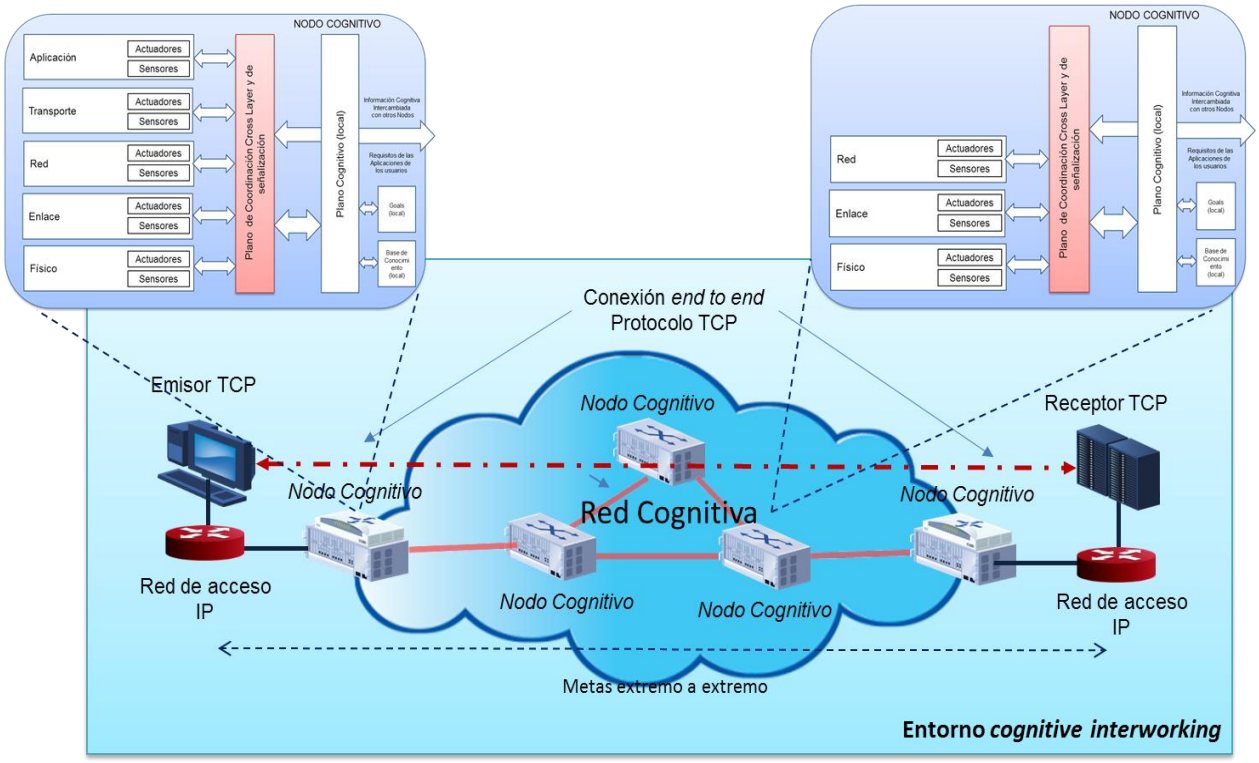


Figura 3.8. Modelo de sistema cognitivo (propuesta del autor)

El concepto de redes cognitivas se puede aplicar a todo tipo de red de comunicaciones, como se anotaba con anterioridad, es en el campo de las redes inalámbricas donde han tenido mayor despliegue (soporte para redes 5G) siendo la radio cognitiva el mejor ejemplo de buenos resultados en este campo. Aunque en realidad existen diferencias en cuanto a su objetivo, mientras la radio cognitiva se concentra en optimizar las condiciones para individuos por separado, el concepto de red cognitiva busca optimizar la totalidad de la red para obtener el mejor desempeño extremo a extremo en la prestación de un servicio. En la actualidad y ante la saturación del espectro radioeléctrico se hace necesario combinar ambos conceptos (radio cognitiva y redes cognitivas) para lograr optimizar un sistema de radio de mayor complejidad.

De otro lado, las tecnologías de redes en la actualidad se diseñan para ocultar detalles de lo que sucede al interior de las mismas, mientras que las CN deben estar atentas a cada suceso (interno como externo). En general el plano de cognición se diseña para que se tenga acceso a todos los datos de la red y a través del plano de datos obtener la información necesaria de todos los nodos cognitivos y realizar los ajustes necesarios. Otro aspecto que se reitera es el tener muy en cuenta como se realiza la comunicación entre los nodos cognitivos, ya que si se transporta mucha información de señalización podría emplearse muchos recursos de la red y desperdiciar todo lo que pueda ganarse con el desarrollo de una CN. Se han definido diferentes métodos de señalización como se muestra en Kliazovich, Granelli & Fonseca (2011) donde se propone que en el desarrollo del modelo de CN la red almacene información (historia) de lo que va sucediendo en la misma en una base de datos, al igual que las condiciones actuales de la red. El reto al diseñar una CN es lograr un modelo que sea rentable y eficiente, en caso contrario el hardware para la implementación de la red cognitiva puede resultar muy costoso.

Las redes cognitivas se pueden materializar a través del diseño *Cross Layer* CL y de la optimización multi objetivo, con estos elementos se plantean diferentes metas en los distintos niveles de la arquitectura logrando convenios o llegando a acuerdos para cumplir con los mismos al momento de prestar un servicio. De esta forma se logra que para el soporte de Internet del futuro, las redes ópticas no solamente se vean como una provisión de ancho de banda entre un par de nodos, si no que permita a los operadores de red afinar y sintonizar estos túneles (o pipes) entre un grupo de

nodos con el objetivo de proveer una red virtual de aplicación específica la cual debe cumplir con las limitaciones en tiempos o retardos y ancho de banda acordes con los requerimientos presentes en la aplicación soportada.

Se observa como el concepto de *Cross-Layer* comparte aspectos similares con redes cognitivas especialmente en romper con el esquema jerárquico y por niveles de las redes tradicionales, así mismo que comparte información con los observadores externos y ajusta su comportamiento a las necesidades de la sesión establecida.

El concepto CL en su esencia inicial se describe con un solo objetivo, y por lo tanto no puede adaptarse a diferentes metas de manera eficiente. Igualmente, CL no aprende del pasado, por lo tanto repite el mismo comportamiento con entradas iguales aun cuando la operación pueda ser ineficiente. Sin embargo, se propone que para lograr un esquema de interacción entre los niveles de una arquitectura jerárquica tradicional, la posibilidad de implementar un CL es una de las mejores opciones y más aún si a dicho CL se le pueden agregar métodos o comportamientos cognitivos que permitan la construcción de una arquitectura cognitiva aplicable a una red de comunicaciones OBS que facilite el soporte y la operación de Internet, en principio de la suite de protocolos TCP/IP.

Como resumen de esta primera parte, se puede anotar que las CN buscan redefinir las redes actuales (estáticas) y enfocarlas hacia redes dinámicas, adaptativas e inteligentes. Una buena forma de lograrlo es a través de la inclusión de modelos de cognicion y convertirlas en redes cognitivas CN, sin embargo CN presenta algunas desventajas, entre ellas el hecho de adicionar complejidad al sistema de red, esto puede ocasionar incremento en el costo de los equipos dedicados a labores de interconexión de elementos en una red cognitiva. Se busca entonces que una solución basada en CN no se convierta en un problema *NP Hard* y que la gestión de la misma no requiera intervención humana, una vez tratados estos aspectos, la CN tendrá mayor aceptación y será implementada en diferentes entornos. Igualmente, aunque se considera que el concepto CN se aplique más a redes inalámbricas, se proyecta que puede ser una buena solución para la Internet del futuro, aunque se espera que la transición de IPv4 a IPv6 suceda con mayor rapidez y por lo tanto se puedan presentar desarrollos sobre redes cognitivas que puedan ser aplicables a cualquiera de las versiones del protocolo IP.

3.2.4. Elementos básicos de una Red Cognitiva

Las funciones principales para habilitar las propiedades cognitivas en una red son: la observación, el análisis, la toma de decisiones y la ejecución de acciones. La figura 3.9 recrea a partir de la propuesta hecha por Thomas (2000) y representa estas funcionalidades como elementos de una pirámide en cuya base se encuentran las funciones distribuidas a través de la red (elementos de observación que pueden incluir desde medida de características físicas hasta variables del nivel de aplicación), de otro lado los elementos funcionales que tienen a su cargo la ejecución de acciones pueden llevar a cabo operaciones simples como el ajuste de parámetros para las diferentes interfaces de red (por ejemplo, una tarjeta de red o NIC – *Network Interface Card*), estos elementos son de menor inteligencia comparados con los que se ubican más cerca a la cúspide de la pirámide, es el caso de las funciones de análisis y toma de decisiones, las cuales presentan una menor distribución a través de la red.

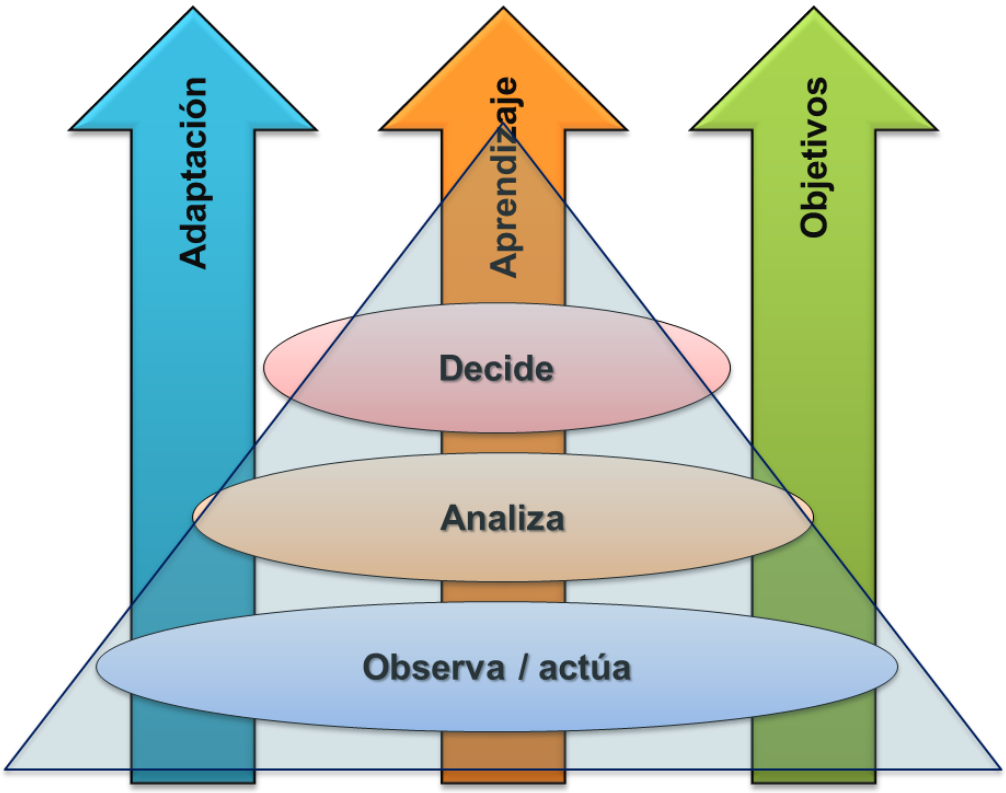


Figura 3.9. Representación de los procesos cognitivos por planos (Thomas 2000)

Es importante tener en cuenta que los elementos funcionales en una red cognitiva deben ser escalables, es decir, pueden presentarse a nivel de nodo o a nivel de toda la red. Como ejemplo, los elementos funcionales observación y acción pueden estar dentro de los diferentes niveles de una pila de protocolos mientras que análisis y toma de decisiones estarían en paralelo a dicha pila ejecutándose como procesos más genéricos.

Generalizando a nivel de red, los **nodos** de la red pueden considerarse como elementos que observan y actúan (contienen elementos que realizan estas funciones), en tal caso las medidas obtenidas en los niveles de los diferentes protocolos se juntan a nivel de nodo y son enviadas como un solo reporte para ser analizados. Igualmente pueden ser consideradas como motores de toma de decisiones, en esta ocasión, la implementación jerárquica brinda la localización a nivel de red antes de pasar dicha información a entidades globales.

Adicionalmente en la misma figura 3.9 se observa como estos elementos funcionales son manejados por tres planos: adaptación, aprendizaje y objetivos. La **adaptación** es una parte esencial de todos los elementos funcionales, habilitándose asimismo para responder a los cambios ocurridos en su entorno. Por ejemplo, el elemento encargado de la observación puede ser requerido para que realice ciertas medidas de los parámetros dentro de la pila de protocolos de uno de los nodos y reportar estas medidas al módulo de análisis en un intervalo de tiempo dado. De esta forma el elemento de observación adaptativo puede ajustar este intervalo con base en el escenario de operación y la configuración de la red. Es común utilizar intervalos cortos en parámetros que cambian con frecuencia mientras los intervalos largos son considerados por parámetros más estáticos. El elemento de observación controla el intervalo reportado, siendo la primera instancia de medida.

Sin embargo, la alta frecuencia de presentación de reportes aumenta la señalización entre los elementos de observación y análisis. En este caso, tanto la observación y como el análisis se realizan en el mismo nodo de red y los mensajes se transfieren internamente, causando muchas veces sobrecarga que podría pasarse por alto, mientras que el análisis es llevado a cabo en otro nodo de la red, señalización consume recursos importantes de la red. Es necesario encontrar un equilibrio en la frecuencia o periodos de observación y la relevancia de la información a transmitir,

se busca no sobrecargar los nodos y los enlaces de la red con información que se emplea para realizar el control de la misma.

El **plano de aprendizaje** es considerado como el núcleo del sistema cognitivo. Se encarga de habilitar a los demás elementos funcionales para llevar a cabo diferentes acciones con base en experiencias pasadas o conclusiones que son almacenadas en el sistema (Base de Conocimiento) y que pueden influenciar decisiones futuras. Dietterich & Langley (2003) muestran en su trabajo la presencia de dos (2) clases de aprendizaje, informal y formal. El primero se lleva a cabo durante la operación normal del ciclo cognitivo mientras que el segundo se transfiere directamente de las entidades que han obtenido dicho conocimiento (por ejemplo el intercambio de conocimiento entre nodos vecinos).

El plano de **objetivos** brinda un conjunto de metas que pueden ser alcanzadas mediante el empleo de procesos de optimización cognitiva. Dichas metas pueden considerar comportamiento extremo a extremo y tener un ámbito de cobertura de la totalidad de la red. Los objetivos de optimización pueden ser definidos desde un esquema red-céntrico por el operador de la red con base en un modelo de negocios seleccionado (basados en los clientes o en requisitos de QoS).

En resumen, los planos de adaptación y objetivos toman en cuenta la observación, el análisis y la toma de decisiones con el fin de elegir un conjunto adecuado de acciones para ajustar la base de los procesos cognitivos para lograr los objetivos de red especificados con anterioridad. Además, el proceso de aprendizaje es responsable de la reconfiguración de elementos dentro del proceso cognitivo basado en experiencia y predicción futura.

Otro punto importante es la existencia de un canal de retroalimentación de control de calidad, que por cada paso de optimización debe realizar un análisis de desempeño de la red resultante, compararla contra el conjunto de objetivos específicos y confirmar que el proceso de optimización está avanzando en la dirección correcta. En el caso que no esté presentándose el avance esperado, el proceso cognitivo se debe retroceder; en el caso del seguimiento de las acciones a tomar se debe verificar que el sistema está un paso atrás en sus objetivos (Kliazovich *el al.* 2010), lo cual implica

tomar las acciones de solución. Este proceso puede repetirse en escalas diferente en la red (aspectos incluidos en la gestión de redes cognitivas).

3.2.5. Proyectos e Iniciativas sobre redes y arquitecturas cognitivas

Para el desarrollo de esta sección se parte del hecho que los tipos de servicios que prestan las redes son variados, que los entornos de las redes son complejos y dinámicos, y que las redes tradicionales carecen de capacidades de autoaprendizaje e inferencia inteligente, además, no se pueden adaptar para brindar un servicio con las mejores prestaciones bajo un ambiente de red que cambia sus condiciones de forma dinámica. En este orden de ideas, se busca aplicar el concepto de lo cognitivo a todo tipo de redes (alambradas, inalámbricas y ópticas). Por lo tanto, objetivo central de esta sección es mostrar una serie de iniciativas relevantes que han sido elaboradas desde hace unos años con el ánimo de modelar y probar arquitecturas de redes cognitivas y con estos fundamento se busca posteriormente elegir los modelos que se toman como base para construir una propuesta de arquitectura cognitiva que ayude a cumplir con los objetivos del presente trabajo de investigación.

- **Proyectos sobre redes cognitivas**

Aunque el enfoque de esta sección son los modelos y arquitecturas cognitivas, se hace una semblanza sobre los diferentes proyectos que se han adelantado respecto a la temática en mención. Se comienza mencionando el proyecto sobre el enrutador personal o PR (*Personal Router*) para acceso a servicios de forma inalámbrica, otros proyectos enfocados en redes de tercera generación o 3G como E2R como impulso a las redes de próxima generación o NGN (*Next Generation Networks*), otra iniciativa importante es el proyecto CogNet (*Cognitive Complete Knowledge Network*) propuesto por la NSF (*National Software Foundation*) donde se destaca la relación existente entre cognición y *Cross Layer*, aunque su aplicación es principalmente hacia redes inalámbricas, la propuesta de un plano de control global (Raychaudhuri *et al.* 2006), como se muestra en la figura 3.10 es considerado un gran aporte al avance sobre redes cognitivas, el modelo muestra además los componentes básicos de un nodo cognitivo, su relación con las capas que componen la arquitectura de red inalámbrica, la instancia del plano de control global y la interacción con los otros nodos cognitivos que conforman la red cognitiva.

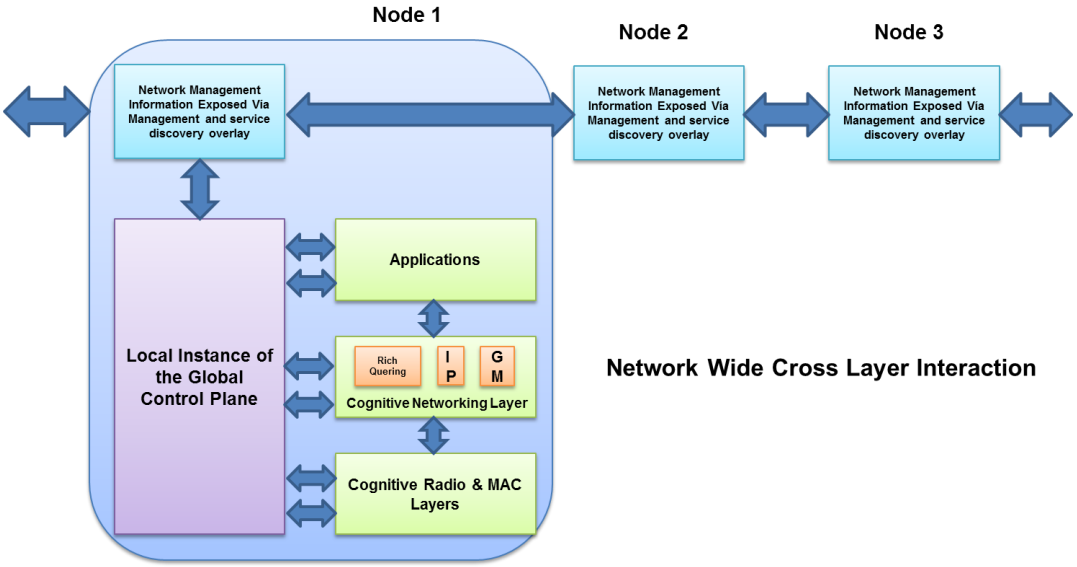


Figura 3.10. Modelo CogNet (Raychaudhuri *et al.* 2006), gráfica recreada por el autor

Otros proyectos al respecto son CROWN, PHYDYAS, SENDORA, ONEFIT, ECODE, entre otros, con grandes aportes en el área, como resultado de estos trabajos se ha impulsado la creación del comité técnico sobre redes cognitivas TCCN (*Technical Committee on Cognitive Networks*) asociado al Instituto IEEE (http://cms.comsoc.org/eprise/main/SiteGen/TC_CN/Content/Home.html) y el LCCN (*Learning-Capable Communication Networks*) en asocio con la IETF.

Puntualmente en el área de las comunicaciones ópticas se cuenta con el proyecto ALPHA (*Architectures for fLexible Photonics Home and Access networks*) apoyado por la Unión Europea y enfocado hacia el área de acceso de banda ancha y el empleo de técnicas cognitivas para asignación dinámica de recursos en esta clase de redes (Popov 2008).

- **Interconexión de redes definidas por software**

En la actualidad existen diferentes propuestas para interconexión de redes una de ellas de gran relevancia trata sobre redes definidas por software SDN (*Software-Defined Networking*) donde se requiere la creación de un nivel SDN y una estrecha comunicación entre el plano de control y el plano de datos, se busca que los administradores de las redes puedan gestionar los servicios de red a través de la

realización de abstracciones de las funcionalidades de bajo nivel, a los servicios se los trata como servicios virtuales VS (*Virtual Services*). La figura 3.11 muestra un ejemplo de cómo se puede visualizar funcionalmente este concepto. Aunque este desarrollo se ha confundido con *OpenFlow* que actualmente comercializa sus servicios como computación en la nube (*Cloud Computing*), no son lo mismo ya que SDN se enfoca en la separación de planos (plano de control del plano de datos), un controlador centralizado y una visión de la red, y que finalmente la red pueda ser programada por aplicaciones externas, a diferencia del concepto de computación en la nube.

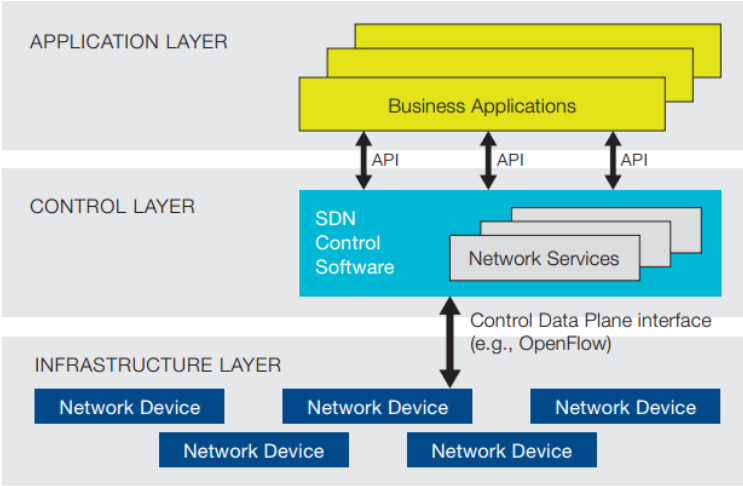


Figura 3.11. Arquitectura SDN (ONF 2012)

El concepto SDN, tiene su parte en las redes inalámbricas denominado radio definido por software SDR (*Software-Defined Radio*), ambos tópicos están muy cercanos al de redes cognitivas, con la diferencia de no contener necesariamente componentes inteligentes.

Como se observa en la figura 3.10, la arquitectura SDN se compone de tres niveles: nivel de **aplicaciones**, dependiente de las metas de negocio, nivel de **control** donde se encuentran los servicios de red, este nivel se comunica con el nivel de aplicaciones a través de APIs (*Applications Programming Interface*) y el nivel de **infraestructura**, el cual contiene los dispositivos de red que finalmente son los que envían o reciben información para su operación a través de una interfaz de control

del plano de datos. En seguida se evidencia como la mayoría de propuestas de redes cognitivas emplean este modelo como punto de partida.

- **Arquitectura propuesta por Thomas *et al.***

En el trabajo realizado por Thomas, DaSilva & MacKenzie (2005) se propone una red cognitiva compuesta por una arquitectura en tres (3) niveles, en la parte superior se encuentran las aplicaciones (o también llamado nivel de requerimientos), las cuales están descritas de acuerdo a las metas extremo a extremo del sistema en lenguaje de especificación de Cognición o CDL (*Cognition Description Language*) o también denominado CSL (*Cognition Specification Language*). El nivel inferior es el nivel físico compuesto por sensores que monitorean el desempeño de la red. En el medio se encuentra el nivel de procesamiento cognitivo el cual toma las decisiones basado en las metas de los aplicaciones y el estado de la red en desde el nivel físico en un tiempo determinado. El Software de red adaptable o SAN (*Software Adaptable Network*) es el nivel inferior y constituye el control físico del sistema y brinda el espacio de acción para el proceso cognitivo.

Las **decisiones** tomadas por el nivel intermedio son el resultado del balance entre las diferentes metas extremo a extremo (*end to end goals*), la información obtenida de sesiones anteriores y la información actual que están siendo tomadas por los sensores, después se debe predecir que clases de ajustes se deben realizar (en lo posible ajustes óptimos) y así lograr las metas propuestas de la mejor forma posible. Estas decisiones se pueden soportar en tecnologías aplicadas en Inteligencia Artificial y puede incorporar diferentes soluciones dependiendo de la situación estudiada. La figura 3.12 muestra en detalle la arquitectura propuesta hacia el año 2007.

Este modelo merece una descripción con mejor detalle ya que es una de las arquitecturas sobre la que se procederá a realizar el diseño a simular. En sus inicios un modelo con características similares fue propuesto por Marr (1982) en su trabajo sobre visión computacional y luego se generalizó hacia otros trabajos, se parte de diferentes disciplinas que involucran ciencias cognitivas operando a diferentes niveles y empleando diferentes técnicas. Se deben considerar distintas tareas en diferentes niveles, luego se combinan y finalmente se crea una infraestructura.

Según Marr existen tres tipos de niveles de análisis dentro de un sistema de procesamiento de información (computacional, algorítmico y de implementación), la figura 3.13 muestra un aparte de la propuesta de Marr sobre procesamiento de información por parte de una máquina.

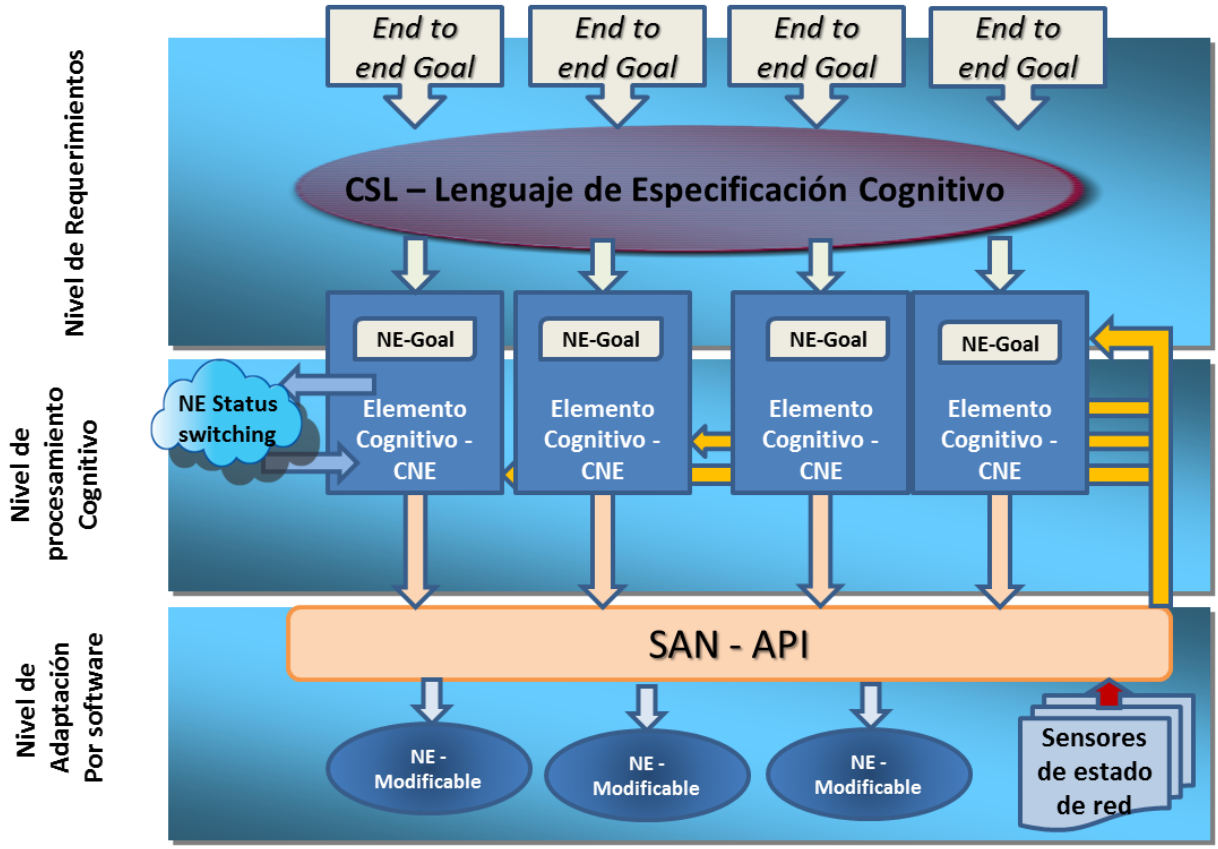


Figura 3.12. Modelo de red cognitiva por niveles (Thomas *et al.* 2007), gráfica recreada por el autor

En general se describe la funcionalidad requerida por una entidad cognitiva para llevar a cabo una tarea de procesamiento de información. A su vez el modelo propuesto por Marr (1982) toma elementos de los modelos cognitivos humanos donde se conformaría un nivel de comportamiento, se cuenta con un nivel cognitivo que determina la motivación de la toma de decisiones de los elementos y el nivel computacional (que propone la aproximación Bayesiana de las limitaciones humana y mecanismos sicológicos) y decide el curso de la acción de un elemento y el nivel neurofísico el cual refleja estas decisiones en el entorno (Eliasmith *et al.* 2012).

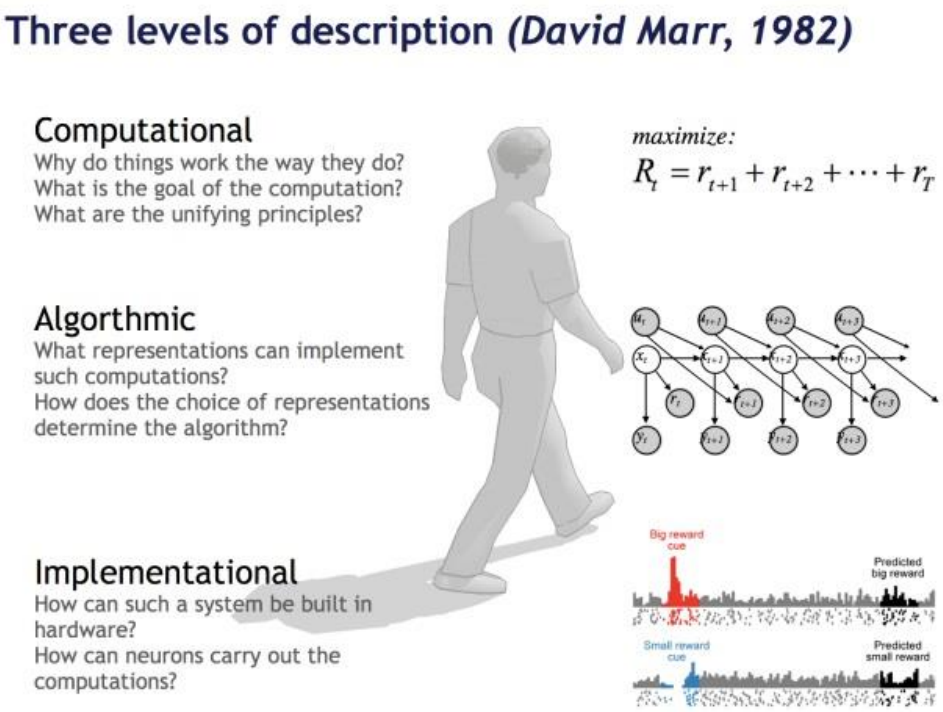


Figura 3.13. Modelo de tres niveles (Marr 1982)

Para el desarrollo y propuesta del modelo cognitivo se toman elementos del trabajo realizado por Eliasmith (2013) y compilado en el libro "*How to Build a Brain a Neural Architecture for Biological Cognition*" donde se definen los elementos que se deben tener en cuenta para la creación de un posible cerebro artificial, así mismo para simular algunos comportamientos del cerebro se hacen pruebas con un conjunto de herramientas computacionales denominada Nengo™ (http://nengo.ca/).

- **Plano de Conocimiento KP**

En el trabajo desarrollado por Clark *et al.* (2003) se propone el desarrollo de un Plano de Conocimiento KP (*Knowledge Plane*) para la red Internet (ver figura 3.14), este plano debe percibir su propio comportamiento y debe poder analizar problemas y ajustar su operación para incrementar su confiabilidad y robustez, se propone entonces que el diseño de la red se base en herramientas tomadas desde la inteligencia artificial y los sistemas cognitivos existentes.

Sobre este concepto existe una gran variedad de literatura, destacándose FOCALE (*Foundation, Observation, Comparison, Action and Learning Environmet*) como un ejemplo de arquitectura autónoma diseñada específicamente para soportar gestión de red.

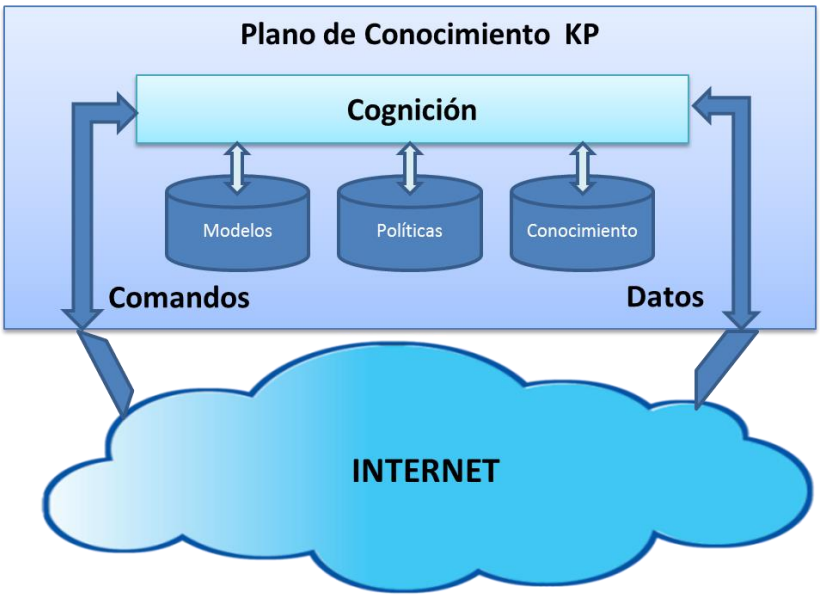


Figura 3.14. Plano de Conocimiento KP (Strassner 2007), gráfica recreada por el autor

Seguidamente, la figura 3.15 muestra la arquitectura de alto nivel desarrollada para FOCALE, en este se muestra un módulo de razonamiento y aprendizaje donde es posible ubicar elementos de aprendizaje de máquina. Igualmente, se muestra el flujo de la información para tomar la decisión de actualizar los dispositivos a partir de la aplicación de nuevas configuraciones, se muestra como se hace una comparación constante con el estado actual de la red y en caso de coincidir con un estado anterior, se continúa con el proceso. FOCALE se construye a partir de elementos de computación autónoma, luego se crea un dominio de gestión autónomo y posteriormente se crea un ambiente de gestión autónomo, cuya conceptualización se puede aplicar a diferentes entornos de red (Strassner, Agoulmine & Lehtihet 2006).

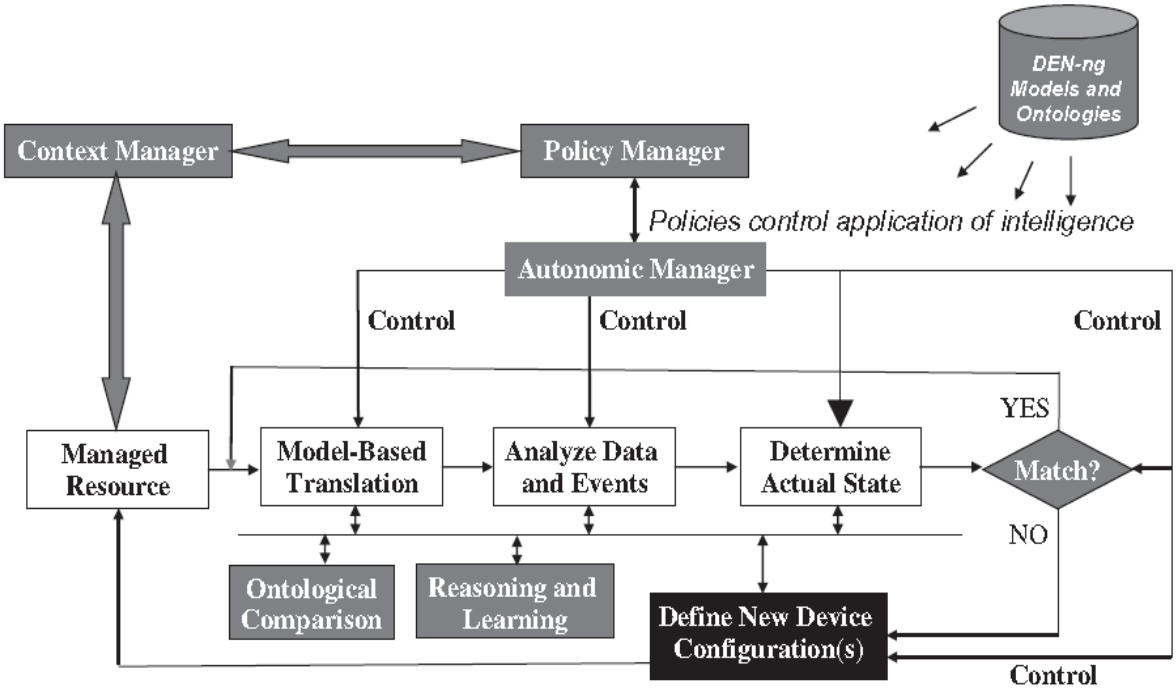


Figura 3.15. Arquitectura completa de alto nivel FOCALE

En este contexto, por medio del aprendizaje de máquina[30] se puede examinar la operación que está siendo ejecutada (se requiere de un contexto, políticas o conjunto de reglas y unos datos de entrada), con esto se puede construir una Base de Conocimiento que puede ayudar a tomar decisiones en el futuro. Igualmente, los algoritmos de razonamiento propuestos pueden generar hipótesis sobre lo que sucede y los posibles problemas que puedan presentarse, para esto toma en cuenta la información censada. Con estas hipótesis, el gestor autónomo trata de verificarlas y para ello usa modelos y ontologías para tomar más datos del modelo y el entorno con el fin de soportar cada hipótesis. La combinación de estos algoritmos de aprendizaje y razonamiento permiten al sistema autónomo adaptarse para cambiar las metas de negocio, necesidades de los usuarios y condiciones del entorno. Estos aspectos son tratados con más detalle en la sección siguiente.

[30] Aprendizaje de Máquina o ML (*Machine Learning*) se define como un programa que aprende de la experiencia **E** con respecto a una serie de tareas **T** y una medida de desempeño **P** (*performance*), si su desempeño en la tarea **T** se mide por **P**, mejorado con la experiencia **E** (nota del autor).

- **Modelo desarrollado en el proyecto CHRON**

Algunos proyectos de gran importancia mundial como el CHRON (*Cognitive Heterogeneous Reconfigurable Optical Network*) desarrollado en Europa con el concurso de diferentes países, ha hecho uso del concepto cognitivo aplicado en redes ópticas que puedan ser empleadas para el soporte de Internet del futuro a través de redes heterogéneas flexibles que permitan controlar parámetros como eficiencia espectral, costo y consumo de energía. Por tratarse de un modelo en cuyo desarrollo se conjugaron iniciativas de varios países europeos, se muestra como resultado una propuesta muy consistente como aporte al concepto de redes del futuro, en el sitio web http://www.ict-chron.eu/ se encuentra información con mayor grado de detalle y se consignan aspectos sobre su arquitectura y componentes, al igual que los mecanismos de interacción entre los mismos.

En este modelo se trabaja alrededor del desarrollo de arquitecturas centralizadas y distribuidas del plano de control, los bloques principales incluyen sistemas de decisión cognitiva, sistemas de monitoreo y protocolos del plano de control, se definen interfaces entre los diferentes bloques, su funcionalidad y la infraestructura física. Finalmente y con el objetivo de realizar la comparación con diferentes métodos, algoritmos o técnicas propuestas en la literatura, se desarrollan varios escenarios comunes los cuales son simulados en el entorno OMNeT++.

El enfoque principal del proyecto es el desarrollar un modelo de red óptica de transporte reconfigurable, se emplean topologías virtuales las cuales se pueden reconfigurar al establecer *lightpaths*, y sobre los cuales se acomodan nuevas demandas de tráfico de diferentes formas. Se busca entonces desarrollar una arquitectura de red y un plano de control que emplean eficientemente los recursos presentes en un escenario heterogéneo (principalmente a nivel físico) logrando las metas de QoS de los servicios y aplicaciones a la vez que se minimizan el CAPEX y el OPEX. Para estos se basa en el concepto de cognición, ya que las decisiones de control deben ser tomadas con un conocimiento apropiado del estado actual del sistema y soportado en procesos de aprendizaje para mejorar el desempeño con la experiencia adquirida.

La figura 3.16 muestra el modelo conceptual desarrollado, básicamente, un sistema de decisión cognitivo es alimentado por los servicios y las respectivas demandas de tráfico, se toma en cuenta el estado actual de la red desde un sistema de monitoreo y aprende de acciones previas para enviar una decisión para el sistema de gestión y control, este envía los comandos desde el sistema cognitivo y además ofrece comunicación entre los diferentes elementos de la arquitectura.

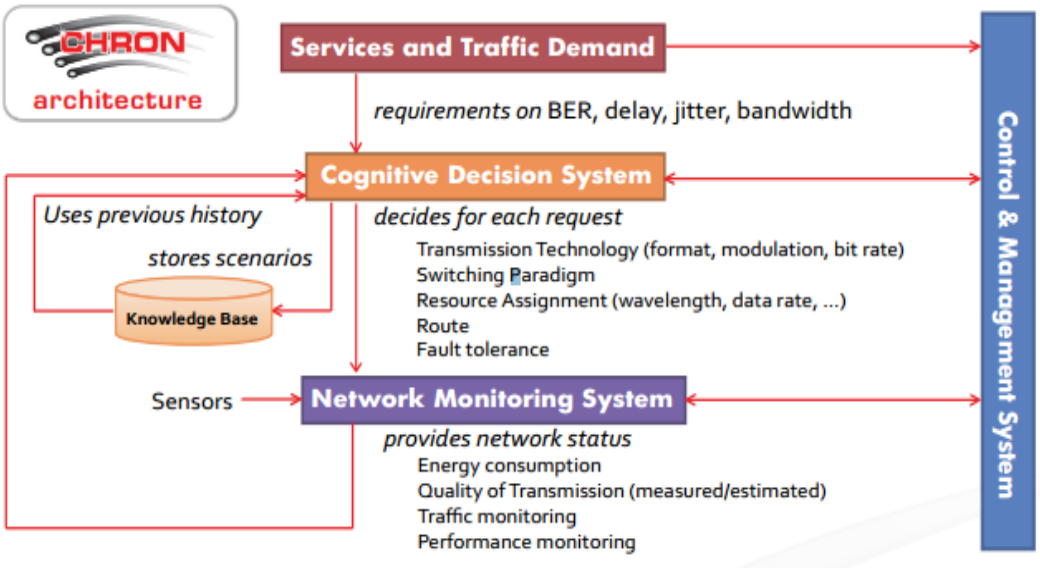


Figura 3.16. Arquitectura conceptual CHRON (CHRON 2011)

Se trabaja inicialmente sobre una arquitectura de red centralizada (control y cognición centralizada) y posteriormente con una arquitectura distribuida (control y cognición). Para el caso centralizado se definen casos de uso: estimación de Calidad de Transmisión QoT (*Quality of Transmission*) la cual se predice antes de establecer un camino (según el Sistema de Decisión Cognitivo). Establecimiento de las conexiones ópticas teniendo en cuenta la ruta, la longitud de onda, formato de modulación, consumo de energía, retardo extremo a extremo entre otros, se busca mediante optimización, minimizar la probabilidad de bloqueo, retardos en el establecimiento de las conexiones al mismo tiempo que se garantizan los requisitos de calidad de servicio. Se realiza agregación de tráfico desde múltiples niveles de forma dinámica, se selecciona un *lightpath*, se modifican los caminos ópticos existentes o se establece uno nuevo mediante topologías virtuales, según nuevas demandas de sub-longitud de onda. Finalmente se hace optimización de la red y del tráfico.

La gran importancia de este desarrollo radica en el hecho de introducir diferentes conceptos como redes heterogéneas, sistemas de decisión con cognición, sistemas complejos de monitoreo, bases de conocimiento almacenando los históricos relevante y el uso de algunas meta heurísticas basadas en poblaciones como algoritmos genéticos.

- **Arquitectura enfocada hacia el nodo de red**

Kliazovich *et al.* (2010) proponen una arquitectura de nodo para una red cognitiva consistente con la pila de protocolos similar a la suite TCP/IP que puede ser empleada para optimizar procesos que tengan directa relación con el desempeño extremo a extremo de una red. Lo anterior implica que los nodos pertenecientes a una red cognitiva se pueden implementar de forma transparente a las pilas de protocolos existentes.

Para operar con una pila estándar de protocolos, cada nivel de la pila es adecuado con una pequeño módulo de software con la capacidad de obtener información interna (mediante sensores) o ajustar parámetros internos (ejecutar una acción). La información obtenida en los diferentes niveles de la pila de protocolos es enviada al plano cognitivo implementado en el respectivo nodo cognitivo. Este plano a su vez se encarga de analizar los datos recibidos y realiza procesos de toma de decisiones. Los resultados del análisis de datos pueden ser clasificados como conocimiento que se almacenará en la base de conocimiento local.

La figura 3.17 muestra la infraestructura propuesta inicialmente para la implementación de una red cognitiva, en ella se destaca la ubicación de los diferentes módulos componentes y la inclusión del concepto de diseño orientado a *Cross-Layer* que será tratado con mayor detalle en la siguiente sección.

La decisión tomada por el plano cognitivo en el respectivo nodo ayuda a optimizar la pila de protocolos y por lo general están orientadas por los objetivos especificados en la base de datos local (a nivel de nodo), muchos de los objetivos propuestos son el resultado de los requerimientos de QoS y demandas de los usuarios respecto a la prestación de un servicio o aplicación.

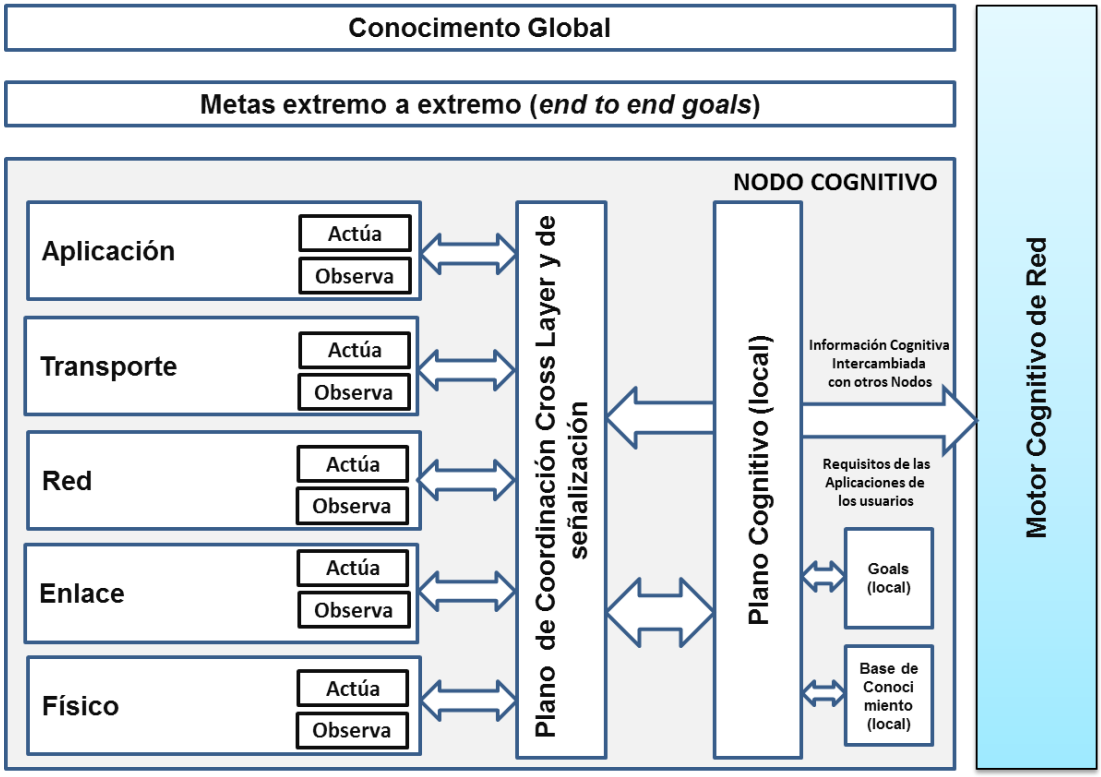


Figura 3.17. Arquitectura básica de nodo cognitivo (gráfica recreada por el autor con elementos de Kliazovich *et al.* 2010)

En la misma figura 3.17 es posible observar como la base de conocimiento y de objetivos están conectados directamente al **plano cognitivo** para un intercambio rápido de información y como este plano se comunica con la pila de protocolos a través del plano de señalización y coordinación del CL (*Cross layer*). Este plano es el encargado de proveer el camino adecuado para distribuir la información de señalización (valores de parámetros, valores umbrales), es importante notar que en el desplazamiento de un paquete a través de una red o internamente en un nodo requiere de formatos de señalización diferentes en cada nivel de la pila de protocolos por donde debe pasar. En resumen este plano es el encargado de proveer el intercambio de información de señalización e interconectar los diferentes elementos que componen la arquitectura del nodo cognitivo.

En este modelo, la información obtenida desde los diferentes nodos ayuda a construir la **base global de conocimiento** después de contrastar con los objetivos definidos y de realizar los respectivos ajustes, como resultado de estas operaciones

se actualiza la información en cada nodo (actualización de su base local de conocimiento y su comportamiento).

Como se había expresado anteriormente, si se trata de conectar diferentes nodos cognitivos para formar una red cognitiva, estos se pueden intercomunicar a través del Motor Cognitivo de Red o NCE (*Network Cognitive Engine*). Este motor es capaz de comunicarse con planos cognitivos de distintos nodos de la red coordinándolos y gestionándolos. Este nodo igualmente, es el encargado de recoger toda la información cognitiva de los diferentes nodos que componen la red. Esta información incluye objetivos locales, requerimientos de las aplicaciones, el mismo conocimiento adquirido por los nodos, o los valores de parámetros específicos de la pila de protocolos. La información recopilada por el motor de cognición corresponde a la generada por la función de observación la cual puede ser obtenida mediante requerimientos que obedecen a un planificador o mediante solicitudes instantáneas. Esta información puede estar relacionada con un nodo en particular o puede ser de los parámetros asociados a un flujo de comunicación.

Una de las características más importantes de una red cognitiva es la **escalabilidad**, esta se garantiza mediante la combinación de técnicas centralizadas (a nivel de nodo) y distribuidas (a nivel de red). En particular, a nivel de los nodos las técnicas cognitivas centrales tales como análisis de datos, toma de decisiones, y aprendizaje, están concentradas en los planos cognitivos de los nodos y son implementadas de una manera centralizada. Además, el software de observación y actuación (o acción) brindan sus resultados y sus planos cognitivos son poco inteligentes.

Manoj *et al*. (2007) modelan la misma arquitectura pero se incluyen procesos de sincronismo complejos entre los niveles de la misma pila de protocolos y se define el concepto de bus cognitivo el cual es el encargado de intercambiar información de señalización entre los diferentes niveles de la pila de protocolos. Sin embargo no se explica cómo se implementan dichos procesos de comunicación. Otros aspectos que pueden faltar en esta arquitectura es la forma como se accede al conocimiento existente (conocimiento global) y no se explica sobre cual red se envía la información cognitiva que se genera en los nodos, esto sugiere que puede ser por la misma red o empleando caminos virtuales superpuestos. Se recuerda que uno de los objetivos es no sobrecargar la red con información adicional.

Finalmente, esta arquitectura (Kliazovich *et al.* 2010) ha sido tomada como base en diferentes propuestas de redes cognitivas y se le han realizado algunas modificaciones y/o adiciones según su entorno de aplicación, en (Zervas & Simeonidou 2010) se incluye el diagrama del ciclo cognitivo involucrando instancias del mismo en los diferente módulos que hacen parte de la arquitectura propuesta.

- **Arquitectura COGNITION**

Zervas & Simeonidou (2010) introducen el concepto de cognición en las redes ópticas y en diferentes planos (plano de datos, plano de control, plano de gestión, plano de servicio y plano de aplicación) como medida para obtener las condiciones actuales de la red y entonces planear, decidir y actuar sobre esas condiciones. La red puede aprender de los procesos de adaptación que se llevan a cabo, y tomar decisiones a futuro, todo esto mientras intenta cumplir las metas extremo a extremo propuestas inicialmente.

Este modelo tiene como elemento central la inclusión del ciclo de cognición o ciclo cognitivo cuya abstracción se muestra en la figura 3.18. La arquitectura propuesta representa un modelo holístico *top–bottom* de un nodo de red cognitivo que consta de cinco niveles o capas en los cuales se ha incluido el concepto de cognición a través de la inclusión del ciclo cognitivo, como se presenta en la figura 3.19 las metas extremo a extremo que están asociadas a los usuarios finales y a las aplicaciones son enviadas hacia una sexta capa o nivel de requerimientos RL (*Requirements Layer*). Este nivel se encarga de entender las metas este proceso permite la traducción semántica y ontológica, precisa y cognitiva de dichas metas, para esto puede hacer uso del lenguaje de descripción cognitiva o CDL (*Cognition Description Language*). Los requerimientos serán manejados caso a caso basados en los diferentes niveles y elementos involucrados. Como se observa, la comunicación entre niveles puede hacer uso de un *Cross Layer* como elemento integrador que recoge y envía información desde y hacia cada uno delos niveles cuando sea necesario.

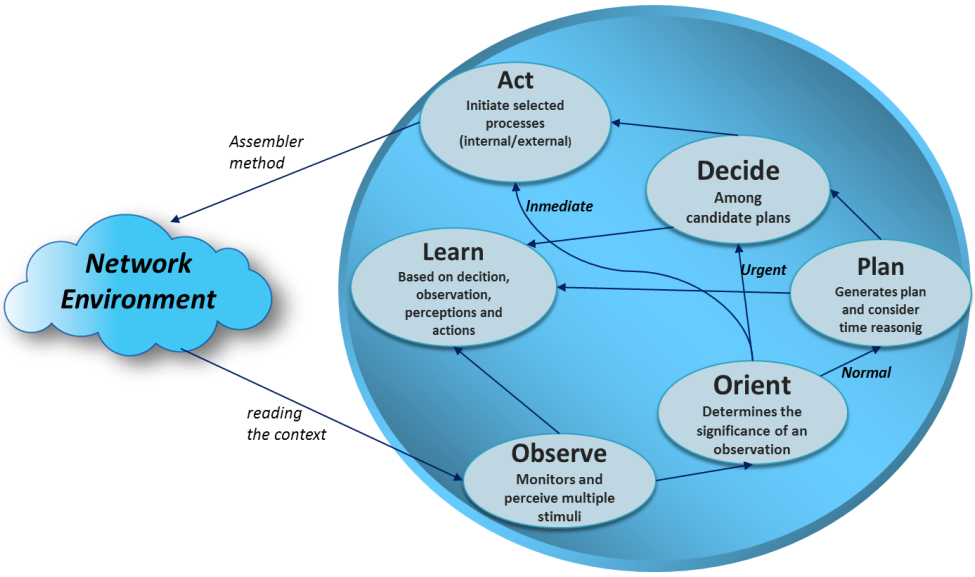


Figura 3.18. Modelo general de ciclo cognitivo aplicado en COGNITION

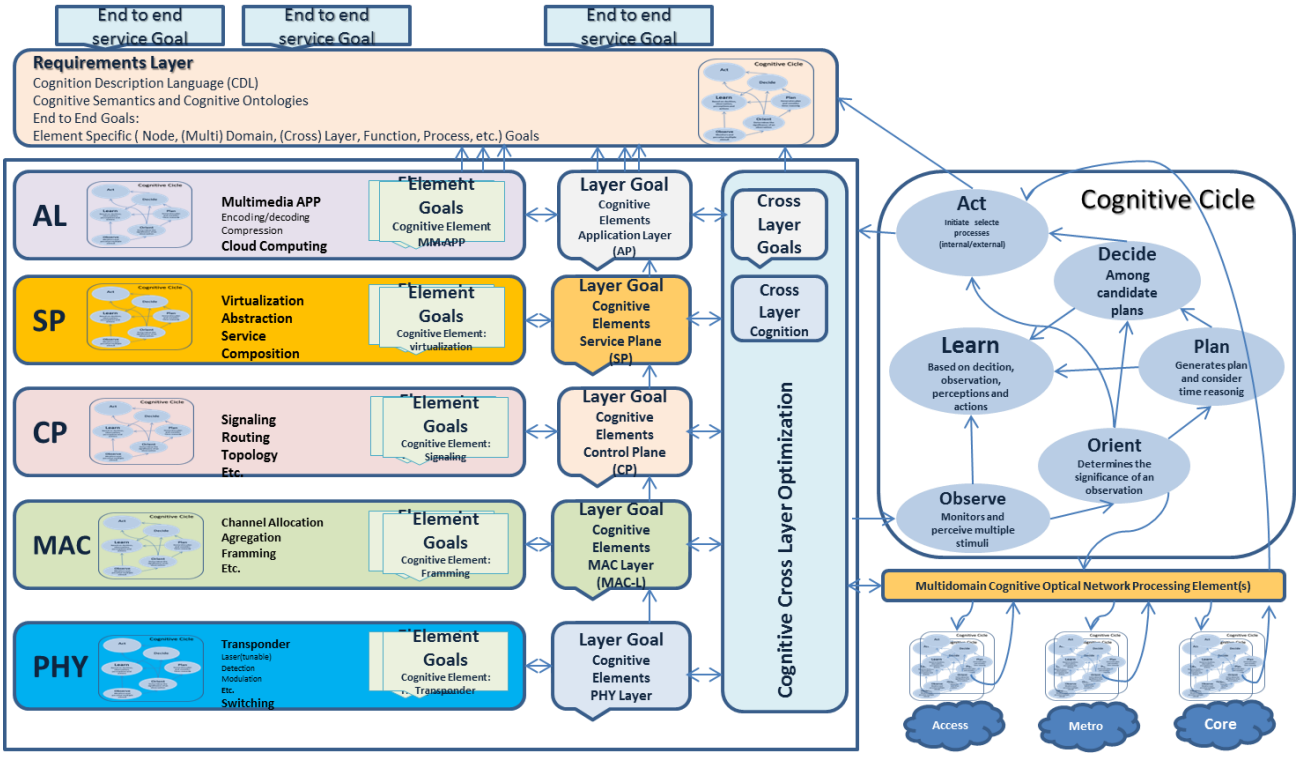


Figura 3.19. Modelo de la arquitectura COGNITION (Zervas & Simeonidou 2010)

En el nivel de aplicación AL (*Application Layer*) se pueden desarrollar elementos cognitivos para crear elementos adaptativos, por ejemplo en el caso de una aplicación multimedia cognitiva los elementos pueden auto adaptarse (aumentando o

disminuyendo el nivel de compresión de la información) para desplegar un servicio con una QoS extremo a extremo bajo condiciones variables de red para un caso particular de un usuario que requiera menos o más resolución.

Al desplazarse al plano de servicio SP (*Service Plane*) se considera que elementos tales como virtualización, abstracción, composición de servicios entre otros, pueden ser auto organizados, auto configurados y auto optimizados bajo ciertos requerimientos de usuarios y condiciones de red. Por su parte el Plano de Control CP (*Control Plane*) consta de mecanismos de señalización, protocolos y algoritmos de enrutamiento, estos protocolos pueden adaptar su estructura, rutinas y máquinas de estado dependiendo de los requerimientos de aplicación y la infraestructura de red. El nivel MAC (*Media Access Control*) contiene protocolos y rutinas reconfigurables, canal cognitivo, asignación de ancho de banda, auto agregación y formatos para el transporte de datos.

Finalmente el nivel físico PL (*Phisical Layer*) contiene los componentes hardware y software reconfigurables para garantiza la QoT en los niveles requeridos. Este modelo según sus autores puede controlar en nivel, complejidad y cantidad de elementos o métodos cognitivos empleados por nivel y por red. Este modelo incluye la necesidad de contar con elementos que al observar puedan manejar elementos de memoria a corto y largo plazo como en el caso del plano de conocimiento. Otro aspecto interesante que se observa en este modelo corresponde al hecho de ofrecer una arquitectura que puede ser extendida entre dominios (acceso, metro y extenso), sin embargo la comunicación interdominio puede estar limitada por el nivel de confianza y acuerdos entre los proveedores de infraestructura involucrados en la prestación del servicio.

Finalmente, se realiza una propuesta de los nodos de acceso y de *core* de una red de comunicaciones cognitiva y sus respectivos componentes. La figura 3.20 muestra dicha arquitectura, la idea parte del hecho de poder tomar un nodo cualquiera de la red no cognitiva y transformarlo en un nodo cognitivo aplicado a redes ópticas. Como se observa, las funcionalidades cognitivas se agregan nivel a nivel lo cual podría causar sobrecarga de acciones en cada capa ya sea para proveer un servicio a la capa superior o para envío y/o recepción de información entre capas, esto puede

obligar a incluir procesos de optimización para intercambio de información, se sugiere el empleo del modelo *Cross Layer*.

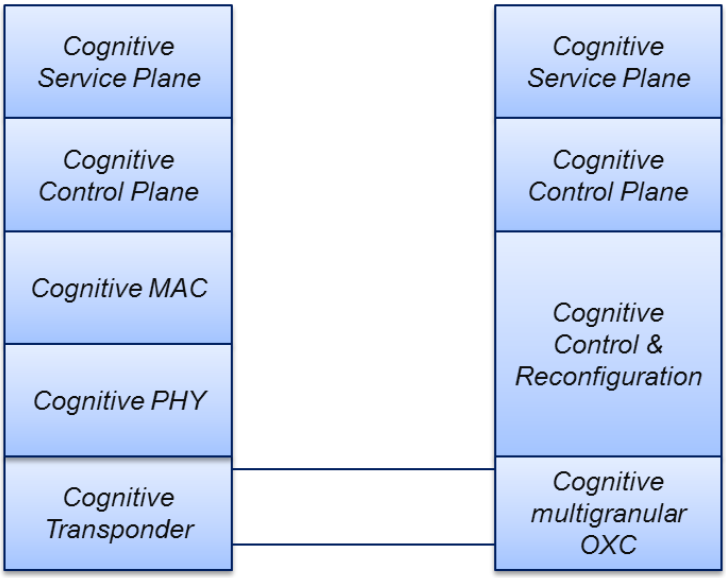


Figura 3.20. Arquitectura del nodo óptico cognitivo a partir de Zervas & Simeonidou (2010)

- **Nueva propuesta de Arquitectura para redes ópticas cognitivas**

Tronco *et al.* (2013), realizan una propuesta sobre la definición de lo que consideran debe ser una red óptica cognitiva, comienzan el desarrollo de su propuesta analizando un par de modelos que han sido tomados como referentes en diferentes trabajos de investigación buscando además la posibilidad de su estandarización. En la propuesta incluyen procesos de interacción entre los niveles IP, MAC, el nivel óptico físico y el plano de control cuando se tiene como objetivo establecer/liberar nuevas conexiones ópticas, optimizar recursos, auto protección, auto reparación y aprendizaje, todo esto con base en los eventos que ocurren en los diferentes niveles.

En este trabajo se analiza por qué los modelos tradicionales de red no son lo suficientemente flexibles y adaptables para tratar con entornos dinámicos cuando se requiera el establecimiento de servicios con diferentes niveles de QoS, por lo general en estos sistemas tradicionales se presenta baja eficiencia en términos de utilización de recursos de red (Yu 2012). De otro lado estos sistemas son gestionados con alta

participación del componente humano en aspectos de planeación y mantenimiento. Lo anterior conduce a que el modelo empleado sea muy costoso, poco flexible, haya baja disponibilidad de la red, bloqueo de recursos y altos intervalos de recuperación ante la ocurrencia de fallas en la red. Se propone el desarrollo de un modelo cognitivo más proactivo y no tanto reactivo cuando se trata de operación de sistema.

Del análisis de la propuesta se puede acotar que se busca incorporar inteligencia (cognición) en la red principalmente en los sistemas de gestión y de control con el objeto de convertirlos en sistemas dinámicos, adaptables, autónomos y con la habilidad adicional de que aprendan de eventos pasados. Esta es una forma de aplicar elementos de razonamiento humano combinado con comportamiento del sistema nervioso central a un sistema de red. Las redes actuales necesitan estar pendientes de lo que sucede en su entorno y en la misma red, conocer las metas en cuanto a requerimientos de los servicios y por parte del operador y de esta manera proveer servicios y aplicaciones con una QoS apropiada, con alta confiabilidad y un óptimo uso de recursos. Las acciones realizadas deben estar basadas en razonamiento, adaptabilidad y autonomía, para lo cual es sistema cognitivo debe planear, decidir, actuar y aprender con base en la información recolectada desde la red principalmente.

Entre las observaciones hechas sobre las arquitecturas cognitivas actuales Tronco *et al*. (2013), están las siguientes:

- Las arquitecturas propuestas no consideran auto protección.
- Explícitamente no se considera la auto reparación, pro actividad y capacidad de operar en múltiples dominios.
- Carencia de metas dada por los operadores de red.
- Falta de interacción con otros niveles de red.
- Algunos carecen de métricas explicitas para evaluar el desempeño de la arquitectura y
- La selección de las técnicas de aprendizaje y razonamiento no se justifican adecuadamente.

En cuanto a los procesos de estandarización sobre redes cognitivas se menciona la creación por parte de la IEEE el comité técnico sobre redes cognitivas TCCN

(*Technical Committee on Cognitive Networks*), el cual puede consultarse en la dirección http://cms.comsoc.org/eprise/main/SiteGen/TC_CN/Content/Home.html se destaca la importancia de las CN en las redes digitales de próxima generación y se cuenta con el soporte de DARPA, NSF entre otros organismos. Aunque su enfoque es mayormente hacia redes inalámbricas. Para el caso de redes ópticas el estándar G.694.1 define una grilla flexible de espectro para los equipos WDM. Por su parte IETF trabaja sobre la extensión de OSPF para asignación de longitudes de onda, extensiones de RSVP-TE aplicables a GRID. En otras palabras no existe un estándar sobre redes cognitivas en el entorno de redes ópticas.

Con estos elementos y basados en el ciclo cognitivo se propone una arquitectura de redes cognitiva aplicable a las redes ópticas, como se muestra en la figura 3.21.

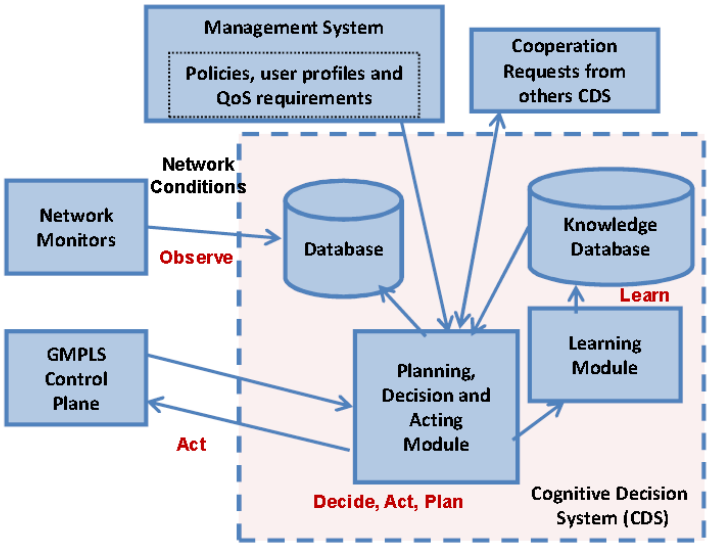


Figura 3.21. Arquitectura de red óptica cognitiva propuesta por (Tronco *et al.* 2013)

El modelo propuesto parte de los perfiles de los clientes de la red, requerimientos de servicios y aplicaciones y algunas de las políticas determinadas por los operadores de la red. Se consideran los monitores de red y la arquitectura distribuida las cuales empleando agentes inteligentes que se encuentran en cada elemento de red cooperan entre sí. Igualmente, se propone la interacción de un plano de control GMPLS extendido, como se muestra en la figura 3.22, en este se conserva el estándar propuesto por la IETF donde se destacan los protocolos de selección de ruta OSPF (con Ingeniería de trafico TE – *Traffic Engineering*), un protocolo de

señalización como RSVP y el protocolo de gestión de conexiones LMP (*Link Management Protocol*), el algoritmo que soporta su accionar es el de enrutamiento o encaminamiento y asignación de longitud de onda RWA (*Routing and Wavelength Assigment*).

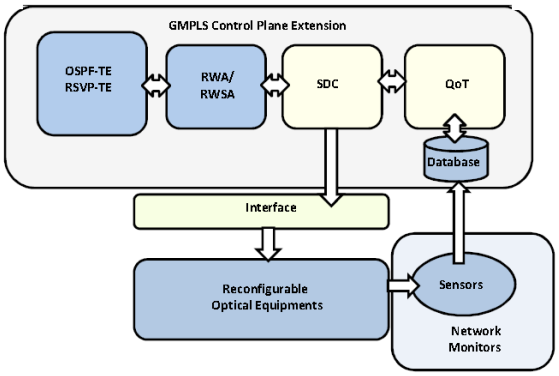


Figura 3.22. Extensión del plano de control GMPLS (Tronco *et al.* 2013)

Finalmente la propuesta permitirá interacción entre diferentes niveles (IP, MAC, PHY) y la posibilidad de realizar auto configuración, auto reparación, auto protección y aprendizaje con base en los eventos que suceden en los diferentes niveles. Este modelo propuesto no cuenta con implementaciones, comparaciones, métricas, entre otros aspectos. Inicialmente se constituye en una propuesta de arquitectura susceptible a cambios y ajustes. Sin embargo constituye un buen insumo de trabajo para el desarrollo de la propuesta cognitiva que se hace más adelante en este Capítulo.

- **Arquitectura Colaborativa y Cognitiva**

Onur *et al.* (2011) proponen la realización de plataformas de redes cognitivas y colaborativas o CCNPs (*Collaborative and Cognitive Network Platforms*), en este ejemplo se propone explotar el concepto de redes personales y el plano de control cognitivo debe explotar los recursos que mejor satisfacen los requerimientos de las aplicaciones de la interconexión de redes, se hace mucho énfasis en el aspecto colaborativo del modelo. Su gran aporte puede estar en la definición de un plano de control cognitivo, el cual a través de la cognición convierte al CCNP en un sustrato de

gestión auto gestionado, es una especie de *middleware* sobre el cual se ejecutarán las futuras aplicaciones sin la intervención del usuario.

Como ejemplo se cita el caso de una emergencia (un terremoto por ejemplo) donde por lo general las redes colapsan en el caso de una persona que está intentando realizar una llamada, se puede conocer su ubicación o puede emplear recursos de redes de emergencia disponibles en forma colaborativa. Aunque su propuesta inicial se hace considerando redes inalámbricas, es posible ampliar su cobertura hacia redes ópticas.

La figura 3.23 muestra el ejemplo de un plano de control en la plataforma de red colaborativa y cognitiva.

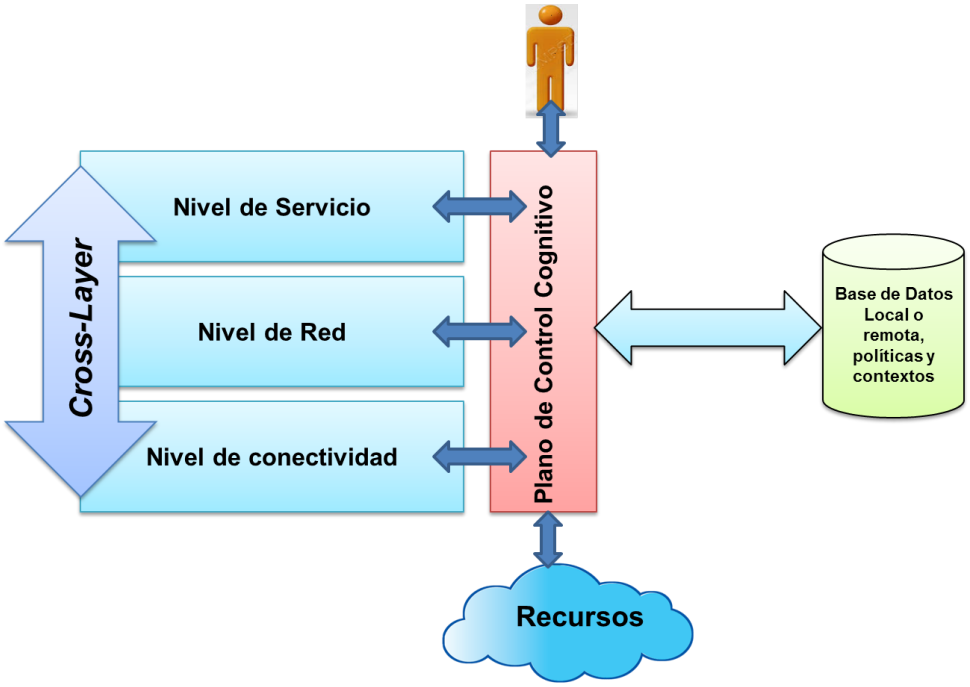


Figura 3.23. Plano de control en CCNP (gráfico del autor)

- **Otras propuestas**

Baldo & Zorzi (2007) emplean la lógica difusa para optimizar el desempeño del CL en redes cognitivas. En otros trabajos como Fortuna & Mohorcic (2009), se proponen mejoras al concepto y en proyectos como CHRON se maneja el concepto desde la

propuesta de un modelo cognitivo aplicable a redes ópticas heterogéneas reconfigurables.

Fortuna & Mohorcic (2009) realizan un análisis sobre la forma como se emplean los términos autónomo y cognitivo, sobre el primero afirman que es un sistema que lleva a cabo tareas básicas tomado del sistema autónomo humano (se refiere a tareas como respirar, control de la temperatura corporal, entre otros), mientras que cognición tiene que ver más con nuevas situaciones donde es necesario el razonamiento y aprendizaje.

Son variadas las propuestas sobre arquitecturas cognitivas aplicadas inicialmente a la explicación de la sicología cognitiva y a las redes de comunicaciones, sobre las primeras se encuentra una tabla comparativa que resume otras arquitecturas cognitivas como ART, 4D/RCS, biSOar, BECCA, EPIC, BDI entre otras se encuentra en http://bicasociety.org/cogarch/architectures.htm, aunque algunos enlaces no se han actualizado. Sobre las segundas (redes cognitivas de comunicación) se ha hecho un acercamiento en el presente documento. Ambos elementos se toman como insumos para una propuesta de una arquitectura de red cognitiva aplicada a redes ópticas, en particular a las redes OBS. En general la información que se encuentra sobre las arquitecturas no es clara en cuanto a cuales son las aplicaciones de las mismas, sus limitaciones, proactividad o reactividad, grado de éxito, lenguaje o metalenguaje para intercambio de información cognitiva, formatos de los mensajes, niveles de actuación, entre otros aspectos.

Finalmente, se reitera que con los elementos analizados es posible proponer una arquitectura que pueda adaptarse a las necesidades del desarrollo de esta Tesis, pero que puede dejar abierta la opción de ser empleadas en otras soluciones. Aunque uno de los objetivos de esta Tesis es proponer y probar algunos Métodos Cognitivos a las redes OBS, es importante contar con una Arquitectura de Cognición como referente.

3.2.6. Lenguajes de Especificación y Descripción Cognitivos

Considerando las diferentes arquitecturas estudiadas, se evidencia la importancia que tiene un Lenguaje de Especificación Cognitivo o CSL (*Cognitive Specification*

Language) para convertir o traducir las metas extremo a extremo a una forma que sean entendidos por los procesos cognitivos.

En esta sección se hace la revisión de como los sistemas de decisión cognitivos tienen la habilidad para percibir las condiciones reales de la red mediante el empleo de sistemas de monitoreo de red. El CSL debe ser conocido por los usuarios y operadores de red para realizar una descripción de sus metas extremo a extremo y de esta forma las sentencias escritas en estos lenguajes deben ser usadas por una red cognitiva para determinar el balance adecuado de los recursos de red.

Mitola (2006) propone el lenguaje denominado RKRL (*Radio Knowledge Representation Language*) el cual contiene el conocimiento empleado en radio cognitivo. Sin embargo, un CSL se parece más a los lenguajes de especificación de QoS ya que se busca es “mapear” los requerimientos y metas extremo a extremo en mecanismos subyacentes entendibles por la red, algunos de estos lenguajes encontrado en la literatura son: SafeTcl, HQML (*Hierarchical QoS Markup Language*), QDL (*QoS Description Language*) y QML (*QoS Modeling Language*), el CSL debe ser adaptable a los nuevos elementos de red, aplicaciones y metas. En resumen, debido a la constante evolución de las redes ópticas, es conveniente seleccionar un lenguaje como de propósito como XML (*eXtensible Markup Language*) que se considera flexible y extensible.

Para esta Tesis, debido a la elección de OMNeT++ como herramienta de soporte para la simulación y como su estructura está basada en el lenguaje C++, los procesos de comunicación entre entidades o nodos para el transporte de información de gestión y control se pueden basar en plantillas XML pero se codifican en C++. Igualmente, cuando los requisitos de QoS son los que determinan el desempeño de un sistema de comunicaciones, se puede recurrir el empleo de lenguajes para descripción de QoS algunos que se pueden mencionar son lenguajes de descripción de interfaces IDL (*Interface Description Language*), extensiones de UML y metamodelos, además de los modelos matemáticos. En común estos lenguajes describen como generar el código para la gestión de conceptos QoS (negociación y acceso a recursos gestionados), la especificación de arquitecturas QoS – aware y gestión de información de QoS en sistemas adaptables.

3.2.7. Técnicas de Aprendizaje de Máquina

Cuando se introducen procesos cognitivos en cualquier escenario incluyendo las redes de comunicaciones, estos se basan principalmente en técnicas de aprendizaje de máquina. El aprendizaje de máquina se define como cualquier algoritmo que mejora su desempeño a través de la experiencia obtenida o ganada durante un periodo de tiempo sin toda la información sobre el entorno en el cual está operando. Si se tiene en cuenta esta definición, se dispone de un conjunto de mecanismos que pueden ser empleados en ML (*Machine Learning*), entre ellos están: Algoritmos Genéticos, Optimización por Colonia de Hormigas ACO (*Ant Colony Optimization*), Q-*Learning*, Redes Neuronales Artificiales ANN (*Artificial Neural Networks*), Optimización por Grupo o enjambre de Partículas PSO (*Particle Swarm Optimization*), redes Bayesianas y autómatas inteligentes. En el Apéndice B se encuentra una descripción más amplia de los diferentes mecanismos y técnicas de ML y optimización.

Se reitera el hecho que para los propósitos de esta Tesis, la propuesta de Métodos o Procesos Cognitivos se hace teniendo en cuenta los conceptos sobre cognicion, ML y Metaheuristicas, antes estudiados.

Una vez se han revisado algunos elementos generales sobre aprendizaje de máquina, en la sección siguiente se extiende este concepto a las redes cognitivas y se explica su aplicación.

3.2.8. Aprendizaje de Máquina en Redes Cognitivas

Una definición común de aprendizaje expresa que el aprendizaje es el proceso de adquirir conocimiento, habilidades, actitudes o valores, a través del estudio, la experiencia o la enseñanza; dicho proceso origina un cambio persistente, medible y específico en el comportamiento de un individuo y, según algunas teorías, hace que el mismo formule un constructo mental nuevo o que revise uno previo. Otra definición anota que el objetivo principal de todo proceso de aprendizaje es utilizar la evidencia conocida para poder crear una hipótesis y poder dar una respuesta a nuevas situaciones no conocidas. Existen una amplia variedad de definiciones que además dividen el aprendizaje en modelos, por nombrar algunos, aprendizaje por asociación

(conceptos artificiales, conceptos naturales y teorías computacionales) y aprendizaje por reestructuración (Pozo 2006, pp.61-222).

En cuanto al aprendizaje de máquina o ML se trata de construir sistemas capaces de optimizar un criterio de desempeño usando datos según ejemplos mostrados o experiencias pasadas. Se dice que un programa aprende de una experiencia $\boldsymbol{E}$ con respecto a una clase de tareas $\boldsymbol{T}$ y medida de desempeño $\boldsymbol{P}$, si su desempeño en las tareas en $\boldsymbol{T}$, de acuerdo con la medida $\boldsymbol{P}$, mejora con la experiencia $\boldsymbol{E}$. De acuerdo con esta definición se presentan algunos pasos donde se debe:

(i) Seleccionar la experiencia de entrenamiento,
(ii) seleccionar la función objetivo,
(iii) escoger la representación de la función objetivo
(iv) seleccionar un algoritmo para aprender la función objetivo
(v) obtener el diseño final.

El campo de ML se ha estudiado por más de dos (2) décadas, como resultado han surgido una serie de posibles aplicaciones entre ellas brindar el soporte a la implementación de la Inteligencia Artificial especialmente en procesos de aprendizaje de máquina (computadores), como es conocido, ML es una disciplina científica que incluye el diseño y desarrollo de algoritmos que permiten a las máquinas tomar decisiones o evolucionar su comportamiento con base en una colección de datos empíricos que pueden ser recolectados desde sensores y analizados comparándolos con datos almacenados en bases de datos y de conocimiento. Es decir ML permite tomar decisiones inteligentes mediante un aprendizaje automático sobre el reconocimiento de patrones.

- **Aprendizaje de Máquina y el Plano de Conocimiento**

Esta sección se aborda teniendo en cuenta los desarrollos de Clark *et al.* (2003) donde proponen una nueva forma de realizar gestión de redes de cómputo principalmente a través del Plano de Conocimiento KP el cual puede enriquecer el paradigma tradicional de recoger datos en los niveles bajos y realizar la toma de decisiones en los procesos de alto nivel. Una idea clave es lograr que el KP aprenda de su propio comportamiento en el tiempo haciéndolo más hábil para analizar

problemas, ajustar su operación y en general incrementar su confiabilidad y robustez. Para lograr este comportamiento se requiere de conceptos y métodos de *Machine Learning* (Langley & Simon 1995; Mitchell 1997).

ML permite identificar cuáles son las experiencias relevantes que ayudan a mejorar un comportamiento. En general en la vida diaria se habla que una persona ha aprendido de la experiencia cuando puede realizar algo que antes no podía o que no sabía cómo realizarlo antes de tener cierta experiencia al respecto. ML trata además con otros campos como la estadística, la sicología cognitiva, teoría de la información, lógica, teoría de la complejidad e investigación de operaciones siempre con el objetivo de entender el carácter computacional del aprendizaje.

Es claro que los formalismos empleados para representar el aprendizaje son decisivos para entender el concepto, para esto se pueden emplear arboles de decisión, reglas lógicas, redes neuronales y notaciones probabilísticas entre otros, todos estos aspectos forman parte de lo que se denomina vida artificial[31] (http://www.alife.org/).

En seguida se hace un resumen de las distintas técnicas empleadas para representar el aprendizaje:

- **Técnicas computacionales puras:**

    - Arboles de decisión (Quinlan 1993).
    - Clasificación del vecino más cercano (Aha *et al.* 1991).
    - Agrupamiento basado en teoría de grafos (Atallah 1999).
    - Reglas de asociación e inducción (Clark & Niblett 1998).

- **Técnicas estadísticas y probabilísticas** (Buntine 1996)**:**

    - Regresión mutivariada.

[31] área que engloba toda la investigación en sistemas desarrollados por el hombre que posean propiedades esenciales de la vida, se hace desde dos perspectivas: Analizar cómo las técnicas computacionales pueden ayudar al estudio de fenómenos biológicos. Analizar cómo los procedimientos biológicos pueden ayudar a resolver problemas computacionales (algoritmos bioinspirados). (Nota del autor).

- Discriminación lineal.
- Teoría de la decisión Bayesiana.
- Redes Bayesianas.
- K-means.

- **Técnicas Computacionales – estadísticas:**

  - SVM (*Support Vector Machine*). Propuesto por Cortes & Vapnik (1995). Para clasificación y regresión.
  - AdaBoost (Freund & Schapire 2002), meta-algoritmo regresivo empleando un clasificador (uso de *weak learners*).

- **Técnicas Bio-inspiradas** (funciones de aptitud (*fitness*) y selección)**:**

  - Redes Neuronales (Rumelhart *et al.* 1986).
  - Algoritmos Genéticos y programación genética y algoritmos evolutivos (Talbi 2009, p.201). La figura 3.24 muestra un diagrama básico sobre esta clase de técnica.
  - Sistemas Inmunológicos artificiales (Dasgupta 1999).
  - *Swarm Intelligence - stigmergy* (Inteligencia de grupo o de enjambre) (Mahmoud 2007).

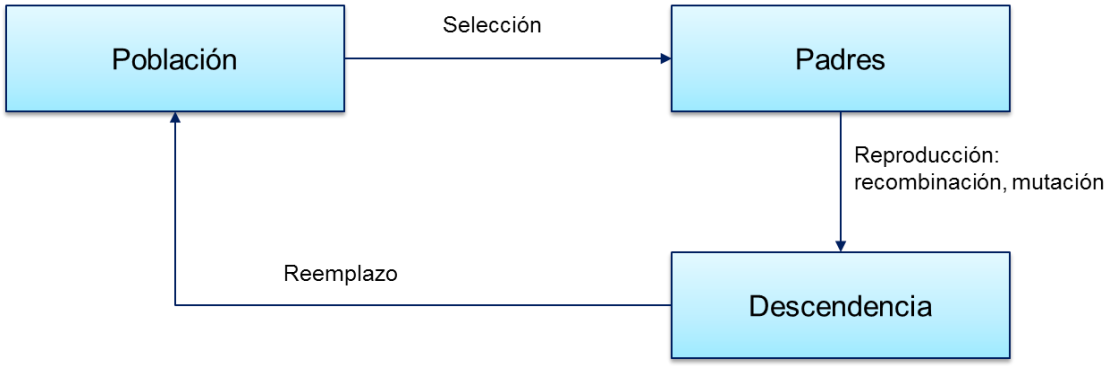


Figura 3.24. Una generación en algoritmos evolutivos

Como se observa existen diferentes opciones y aun no se define cuál de los formalismos se acomoda mejor para describir ML, según esto se puede acomodar el formalismo que se requiera o que mejor se adapte al problema presentado.

- **Tipos de aprendizaje**

Existen diferentes clasificaciones sobre los tipos de aprendizaje, la literatura consultada muestra los siguientes:

- **Aprendizaje supervisado**. El problema fundamental es encontrar una función que relacione un conjunto de entradas con un conjunto de salidas. En este caso se cuenta con un supervisor y la información se puede representar mediante vectores o etiquetas. Tipos principales de problemas: Clasificación y regresión. Requiere entrenamiento previo.

- **Aprendizaje no supervisado**. No hay etiquetas para los ejemplos u observaciones, el problema fundamental consiste en encontrar la estructura subyacente de un conjunto de datos presentes. Puede requerir entrenamiento previo antes de usar el modelo.

- **Aprendizaje basado en memoria**. Vecinos más cercanos y modelos de aprendizaje *lazy* y *eager*.

- **Aprendizaje semi-supervisado**. (Blum & Mitchell 1998). Cuando algunos ejemplos se pueden etiquetar.

- **Aprendizaje activo (con refuerzo).** Generalmente se da en un contexto de un agente actuando en un ambiente. No se le dice al agente explícitamente si se equivoca o no. El agente es castigado o premiado (no necesariamente de manera inmediata), el problema fundamental es definir una política que permita maximizar el estímulo positivo (premio). La figura 3.25 muestra un ejemplo de esta técnica donde se muestra la incidencia del entorno al brindar una recompensa al agente por realizar su tarea.

- **Aprendizaje en línea**. Únicamente una pasada por los datos (gran volumen de datos y en tiempo real). Puede ser supervisado o no supervisado. El problema fundamental consiste en extraer la máxima información de los datos con el número mínimo de pasadas.

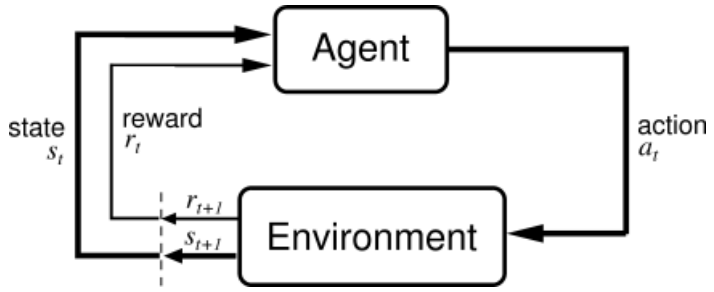


Figura 3.25. Técnica de refuerzo con recompensa (Sutton & Barto 1998)

- **Formulación de problemas en el entorno de Aprendizaje de Máquina**

Se han propuesto diferentes maneras para formular un problema dentro del concepto de ML, en seguida se tratan los más relevantes:

- **Aprendizaje por clasificación y regresión**, es la manera más común para adquirir conocimiento en el desempeño de tareas de clasificación y regresión. La clasificación involucra el asignar un caso de prueba para uno de un conjunto finito de clases, mientras que la regresión permite predecir el caso empleando variables continuas o atributos. Para el contexto del diagnóstico de redes un problema de clasificación puede consistir en decidir si la falla en una conexión se debe a que el sitio tomado como objetivo se ha caído, el sitio objetivo se ha sobrecargado, o si el prestador del servicio está fuera de servicio (ISP *is down*). Por analogía, el problema de regresión puede consistir en predecir el tiempo que toma la conexión en retornar a su estado funcional. Por ejemplo, una descripción del estado de la red OBS puede incluir atributos para pérdida de paquetes (probabilidad de pérdida de ráfagas), tiempo de transferencia (retardos extremo a extremo) y conectividad (rutas y asignación de longitudes de onda). Igualmente, se pueden asignar atributos numéricos por ejemplo a los nodos resaltando un orden de prioridad entre nodos adyacentes. Si no es posible conocer un atributo (puede permanecer oculto) se puede predecir el valor de dicho atributo por el comportamiento de otros atributos que si pueden ser observados (Predicción flexible o completar el patrón) se puede emplear para atributos simbólicos, atributos continuos o una mezcla de ellos. Igualmente se puede pensar en encontrar la distribución de probabilidad conjunta sobre el espacio total de las posibles instancias.

Se puede formular un número distinto de tareas que producen conocimiento para ser usado en clasificación y regresión. La técnica o tarea más común es el aprendizaje supervisado en este caso el aprendiz se somete a un entrenamiento con clases asociadas o valores de los atributos que tiene que predecir. Por ejemplo, un método de aprendizaje supervisado puede tener unas 200 instancias con cuatro tipos diferentes de fallas (unas 50 instancias por cada clase) con cada instancia descrita en términos de los atributos que deben emplearse durante la clasificación.

El caso de regresión puede consistir en determinar el tiempo que toma para restaurar la conexión para cada instancia de entrenamiento. Se cuenta Igualmente, se puede contar con aprendizaje no supervisado una de sus propuestas es el *clustering* (Fisher 1987; Cheeseman *et al.* 1988) se puede usar la técnica de regresión mediante la opción de completar el patrón. Para el ejemplo tratado, las 200 instancias se pueden agrupar en clases que representen cual es el tipo de interrupción que produce las fallas, igualmente se cuenta con la técnica conocida como estimación de densidad (Priebe & Marchette 1993) se procura construir un modelo que prediga la probabilidad de ocurrencia de una instancia específica, para el ejemplo de la red OBS se puede tener la misma cantidad de datos sobre la interrupción del servicio, se puede obtener un método que genere una función de densidad de probabilidad que cubra las instancias ya entrenadas y las nuevas instancias. Una siguiente opción es emplear aprendizaje semi-supervisado, por ejemplo se puede tener el caso que solo 20 de las 200 instancias están entrenadas y tienen información de clase, se pueden considerar que para el resto de instancias se tengan clasificadores más exactos.

- **Aprendizaje para actuar (seleccionar acciones) y planeación**, aprendizaje de conocimientos para seleccionar acciones o planes para que sean ejecutados por un **agente**. Una forma puede ser seleccionar una acción como reacción a un suceso e ignorar las acciones pasadas, igualmente en el caso de configuración de una red por parte de un experto, se puede tener un sistema que este pendiente de tomar todas las acciones que sigue el experto, almacenarlas y tenerlas listas para un siguiente proceso de configuración, además puede mejorar los pasos e intentar realizar la misma tarea en menos tiempo, a esta opción se la conoce como clonación del comportamiento (Sammut *et al.* 1992).

Otra opción se aprendizaje se logra mediante el refuerzo (recompensa retardada - premio), en este caso un agente lleva a cabo una acción por ejemplo de tomar datos del entorno y recibe una señal de recompensa que indica el deseo de conocer el estado resultante. Sin embargo, debido a que el agente puede que necesite muchos pasos antes de alcanzar el estado deseado (por ejemplo restablecimiento de la conexión el servicio) la recompensa puede retardarse. Para el caso de enrutamiento dinámico de una red, el sistema puede tratar de establecer diferentes rutas empleando políticas de enrutamiento diferentes basadas en la observación del desempeño de la red.

Otras opciones pueden ser mediante aprendizaje desde la solución de problemas. Con este método se puede llegar a soluciones adecuadas, ciclos, no soluciones, que permiten aprender que opciones se deben seguir y cuales no (se produce un conjunto de acciones deseables, no deseables y relativamente deseables). Algunos investigadores sobre ML han estudiado métodos que pueden asumir acciones y requerir menos ejemplos para su entrenamiento. Una aproximación es hecha por Moore *et al.* (1998) emplea regresión para analizar los resultados de experimentos previos y determinar una región de interés en el cual la función objetivo pueda aproximarse mejor, entonces selecciona un nuevo punto de prueba que esta distante de otros puntos de prueba, mientras permanece en la misma región. Para el caso de la configuración de una red, dado un conjunto de parámetros (configuraciones) para los cuales el desempeño ha sido medido, se fija una distribución de probabilidad que permita predecir donde están localizados los puntos denominados como buenos, entonces, se muestrea un nuevo conjunto de configuraciones acordes con esta distribución, se mide su desempeño y se continua hasta que haya convergencia.

Finalmente, dentro de este proceso de aprendizaje para seleccionar acciones y planeación, primero, en muchos dominios la acción de censado requiere de una invocación activa, entonces, el agente puede aprender las políticas para realizar el censado, decir cómo se puede soportar un diagnóstico de eficiente de la red OBS y activar los efectores para realizar acciones tales como cerrar un enlace en respuesta a un posible ataque. Igualmente, algunos métodos de aprendizaje para planear asumen la disponibilidad de modelos de acciones que describen los efectos esperados cuando se invocan ciertas acciones. Esto puede conducir a

que se pueda aprender de tales modelos de acciones por simple observación. Estos modelos se pueden emplear para soportar aprendizaje de alto nivel sobre políticas para actuar y planear.

- **Aprendizaje para interpretación y entendimiento**, en este caso de trata de poder interpretar situaciones y eventos, una forma es mediante la clasificación ya que permite entender una instancia que pertenece a un ejemplo de alguna clase. La interpretación requiere de modelos que expliquen los datos en términos de estructuras profundas (abducción). Este modelo es muy empleado en la interpretación del lenguaje natural.

En resumen, se pueden formular las tareas de ML de diferentes formas. Estas pueden diferir en la forma como el conocimiento adquirido es utilizado y en la naturaleza de los datos de entrenamiento que controlan los procesos de aprendizaje. La tabla 3.2 muestra lo visto en este aspecto.

Formulación	**Tarea desempeñada**
Clasificación y Regresión	Predice y dando x Predice el resto de x dada una parte de x Predice $P(x)$ dando x
Actuación y Planeación	Selecciona iterativamente una acción a en un estado s Selecciona acciones $< a_1, .., a_n >$ para alcanzar una meta g Encuentra el valor a fijar s para optimizar un objetivo $J(s)$
Interpretación y entendimiento	Empleo de un *parser* o analizador sintáctico que convierte un flujo de datos en una estructura de árbol de análisis de objetos o eventos

Tabla 3.2. Resumen de las opciones de formular problemas en ML

Una vez revisados los conceptos más relevantes sobre cognición, redes cognitivas, aprendizaje de máquina y sus diferentes componentes se procede a realizar un análisis del concepto de *Cross Layer* debido a la importancia para el desarrollo de la presente Tesis, aunque en la actualidad existe mucha literatura al respecto, el autor ha revisado diferentes fuentes y realiza aportes propios en aras de plantear un diseño de red TCP/IP sobre OBS acorde con los requerimientos expuestos al comienzo del documento.

3.2.9. Como entender una infraestructura Cognitiva

Una vez revisadas diferentes arquitecturas cognitivas es importante describir los aspectos a tener en cuenta para comprender lo que se requiere de una de estas arquitecturas, en seguida se plantean algunas preguntas al respecto:

- Qué son y cuáles son los elementos cognitivos en la red?
- Cuáles son las metas extremo a extremo?
- Cuáles son las metas de los diferentes elementos?
- Donde están localizados dichos elementos?
- Como se comunican los elementos cognitivos entre sí?
- Cuanto altruismo deben mostrar los elementos cognitivos?
- Cuanto conocimiento tienen?
- Cuanto control se puede ofrecer?
- Que funciones debe desempeñar el proceso o método cognitivo?
- Como se lleva a cabo el razonamiento, aprendizaje y planeación?
- La arquitectura permite tener una visión global y local de la red?
- Donde reside la cognición en una red?
- Se puede hablar de que una red tenga “conciencia” sobre su entorno?
- Cómo se definen las metas a nivel de red?
- Cómo esas metas se cumplen en conjunto por los nodos y enlaces de la red?
- El comportamiento de los nodos debe ser egoísta o altruista?
- Cuanta información de control debe circular por la red sin sobrecargarla?
- Cuanto control es necesario para llevar la red al punto de operación ideal?

Con esta serie de preguntas y otras que puedan surgir es posible hacer una evaluación de cualquiera de las arquitecturas estudiadas y realizar una toma de decisión sobre cual emplear cuando se requiera que las redes cumplan con la condición de agregar cognición a las redes de comunicación existentes.

Sobre el razonamiento evidencia la forma como se selecciona que acciones a seguir. Igualmente, emplea el conocimiento histórico y el conocimiento actual de la red lo que implica saber cuáles son las condiciones de la red, preferencias de los usuarios y políticas consideradas. Sobre el aprendizaje se puede considerar como un proceso de largo plazo donde se acumula conocimiento basado en los resultados obtenidos

de acciones pasadas. El aprendizaje enriquece el conocimiento de los elementos cognitivos basados en esto pueden mejorar la eficacia de los razonamientos futuros. Algunas veces el razonamiento y el aprendizaje pueden ir de la mano. Respecto a la planeación se puede definir como el proceso de desarrollar una secuencia estratégica de acciones con el objetivo de lograr una meta. En general no existen muchos ejemplos de cómo planear acciones en forma distribuida.

Finalmente, cuando se requiere adelantar un diseño cognitivo además de lo analizado, se deben considerar entre otras las siguientes decisiones:

- **Egoísmo versus altruismo**. Comportamiento colaborativo distribuido de los agentes o lo nodos cognitivos o un comportamiento egoísta con poca o ninguna colaboración. Igualmente, cómo las adaptaciones locales afectan el desempeño extremo a extremo. Cuanto y como convergen dichas adaptaciones?.

- **Ignorancia versus conocimiento**. Cuál es el costo de la ignorancia? (DaSilva & Mackenzie 2007). Cuanta información de la red es necesario recoger para que un nodo pueda tomar decisiones locales. Es necesario que la totalidad de la red se entere de las acciones que ha tomado un nodo?.

- **Nivel de control deseado**. Algunos autores proponen evolucionar o modificar el plano de control de MPLS o el que se esté utilizando la red en el momento de acuerdo con los requerimientos propuestos, aunque esto puede ocasionar incompatibilidades a largo plazo es una opción a considerar. Igualmente, respecto a la implementación del motor cognitivo pueden surgir algunas preguntas. Por ejemplo, cuáles son las técnicas cognitivas más eficientes?, que tan rápido opera el método cognitivo en el nodo?, como afecta esta reacción a la totalidad de la red?, cuando decidir que se debe tomar información del entorno y cuando una simple decisión heurística puede resultar mejor?

En resumen, en esta sección se han revisado una serie de conceptos que son definitivos al momento de tratar con aspectos de cognición aplicados a las redes de comunicaciones. Es un campo de investigación abierto con muchas preguntas y donde se pueden encontrar distintas propuestas sobre cómo construir arquitecturas de redes cognitivas, a partir de los modelos realizados para explicar la sicología

cognitiva en los seres humanos. Estos modelos son la inspiración para los desarrollos aplicados a las redes actuales de comunicaciones con el objetivo primario de lograr introducir inteligencia y cognicion en las mismas. Finalmente, se han realizado diferentes trabajos sobre arquitecturas cognitivas, en el trabajo realizado por Chong, Tan & Ng (2009) se presentan los resultados de comparar seis arquitecturas cognitivas, sus observaciones y conclusiones sirven de insumos a la propuesta de arquitectura cognitiva de la sección 3.4.

3.3. Conceptualización *Cross Layer - CL*

3.3.1. Introducción

En principio, para ambientar mejor la temática se toman en cuenta una serie de trabajos desarrollados sobre *Cross Layer* en redes inalámbricas, que como es conocido, el diseño CL posee una amplia literatura en este campo desde hace más de una década como se puede encontrar en los trabajos de Pointure (2006) y Popovski *et al.* (2009) principalmente. Posteriormente se hace énfasis en las características que debe tener un CL y en seguida se entra a proponer un diseño apropiado como complemento al modelo de nodo y red cognitivos.

Las diferentes aproximaciones para el diseño de cualquier red de comunicaciones tradicionalmente se han enfocado en arquitecturas por capas y su comportamiento jerárquico se asemeja al modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos OSI (*Open System Inteconnection*) definido en la norma ISO/IEC 7498-1, mostrado en la figura 3.26, donde se hace una definición jerárquica en niveles o capas compuestas de entidades o entes (procesos) diferentes entre sí, estos realizan operaciones específicas e independientes de los demás niveles (aplicando para esto los conceptos de desarrollo modular y agrupaciones funcionales).

El diseño modular implica que cada nivel posee un número reducido de interfaces de comunicación con los niveles adyacentes y la funcionalidad jerárquica obliga a tener una interdependencia entre los mismos pero siguiendo un conjunto de normas estrictas, donde la adyacencia entre niveles marca el cumplimiento de dichas

normas. Esta misma concepción ha sido empleada para el *stack*[32] o pila de protocolos de Internet (familia de protocolos TCP/IP). Ambos enfoques van en contravía con lo que muchos autores consideran que debe ser el diseño orientado a *Cross Layer* y en lo que debe ser una red cognitiva.

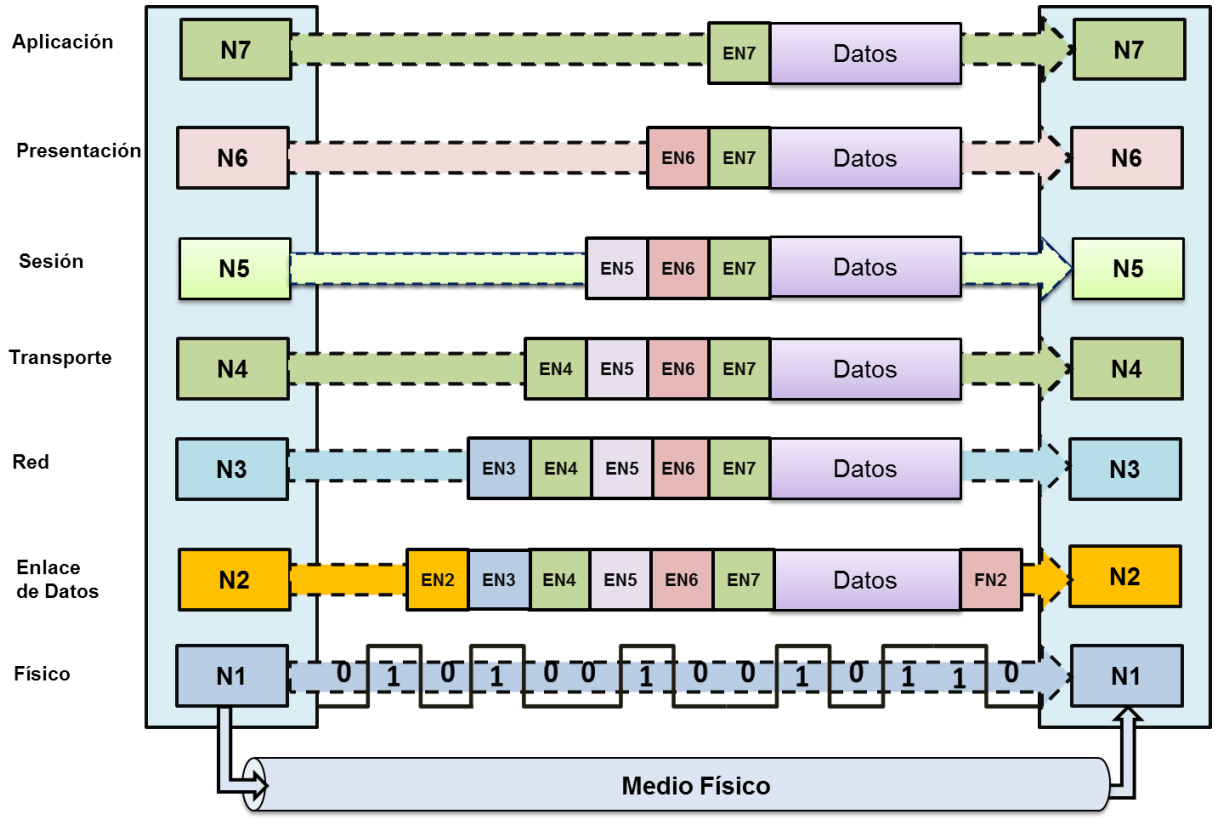


Figura 3.26. Modelo de referencia OSI en un proceso de comunicación en un sentido y las unidades de datos que se intercambian extremo a extremo y entre niveles de la arquitectura ($\boldsymbol{EN_i}$: Encabezamiento de Nivel $\boldsymbol{i}$, con $\boldsymbol{i} = \mathbf{1}, \dots, \mathbf{7}$)

En la literatura existen muchas aproximaciones para realizar un CL, en Srivastava (2005) se hace un estudio en detalle de las diferentes alternativas que se proponen para el diseño e implementación de un CL. Como se ha anotado anteriormente, el enfoque CL se refiere a protocolos diseñados para explotar la interdependencia que existe entre los diferentes niveles de la arquitectura jerárquica con el objetivo de

[32] Se refiere a una arquitectura de comunicación en forma de pila que integra diferentes protocolos organizados por capas o niveles.

obtener un mejor desempeño de la red en determinadas circunstancias, lo que significa que no se siguen las reglas de jerarquía[33] como se hace formalmente.

Las propuestas sobre diseños de CL tienen diferentes perspectivas, en principio entre los diseñadores que trabajan en distintas capas de la pila o *stack* de protocolos no hay un acuerdo sobre cuales funciones son las básicas para el diseño y cuáles son los roles que dichas capas deben jugar cuando se realiza un proceso de comunicación de datos. Igualmente, la sinergia existente entre el punto de vista del desempeño y lo concerniente con la implementación de la arquitectura es débil.

De acuerdo con los diseños revisados y las publicaciones analizadas, se concluye inicialmente que los medios y sistemas inalámbricos poseen más elementos que pueden ser tratados mediante un *Cross Layer* que los medios alambrados. Este último aspecto presenta un reto para el diseño de un CL aplicable a redes ópticas en particular a redes OBS, su funcionalidad interna y su interacción con la suite de protocolos TCP/IP. Igualmente un aspecto a tener en cuenta en el comportamiento de las arquitecturas jerárquicas por niveles es que cuando un ente de cierto nivel (n+1) necesita un servicio que debe ser prestado desde un nivel inferior (n), solo hace uso del mismo sin entrar en detalles de cómo se le provee dicho servicio. Lo anterior implica que muchos protocolos podrían no necesitar algunas interfaces que están presentes en la arquitectura de referencia o necesitar de algunas interfaces que aún no están definidas en la norma.

De forma alternativa, los protocolos tipo CL pueden ser diseñados para realizar “violaciones” a las arquitecturas de referencia tradicionales, esto se puede lograr mediante la comunicación entre niveles no adyacentes o el poder compartir variables en una piscina de datos entre diferentes niveles de la arquitectura. Los siguientes aspectos determinan el diseño orientado a CL, donde existen diferentes propuestas de definición, entre ellas se anota que un CL corresponde al diseño de un protocolo que viola una arquitectura de comunicaciones de referencia, lo cual como se ha dicho, implica la creación de nuevas interfaces entre niveles, redefinir los límites de los niveles, no realizar el diseño de un nivel independientemente de los procesos

[33] En general estas reglas implican que los entes que pertenecen a los niveles superiores solicitan a través de una interfaz la prestación de servicios desde los niveles inferiores y a su vez los niveles inferiores prestan servicios a los niveles superiores en orden jerárquico. (Nota del autor)

realizados en otros (disminuir la modularidad) y tener la posibilidad de sintonizarse entre distintos niveles sin tener en cuenta la línea jerárquica.

Lo anterior implica tener la libertad para diseñar protocolos que trabajan en diferentes niveles de forma independiente y que pueden imponer condiciones en cuanto al procesamiento de información en otros niveles (Melodia *et al.* 2006). Algunos autores entre ellos DaSilva & Mackenzie (2007) y Kawadia & Kumar (2005) consideran que al hablar de CL se hace referencia a una metodología para desarrollar procesos que no siguen las restricciones propias de una arquitectura jerárquica. Es posible también encontrar propuestas en las cuales se puedan construir "súper niveles" a partir de la unión de funciones entre diferentes niveles no necesariamente adyacentes. Todas estas opciones o propuestas de diseño implican que los diseñadores de sistemas puedan implementar CL a través del empleo de métodos estáticos o dinámicos, estos últimos responden a los cambios en las condiciones de las redes (Lin *et al.* 2008) y (Mehlman 2010).

3.3.2. Por qué un diseño *Cross Layer*?

Para el caso de la pila de protocolos TCP/IP (como se observa en la figura 3.27) aunque normativamente no se define una sub red específica, casi siempre se encuentra a Ethernet como la red típica de soporte[34], sin embargo es posible tener como subred una red OBS, como se propone en este estudio.

En este último caso si se considera la opción cuando se presentan problemas en la subred tales como una posible pérdida de información no tolerable o el aumento inesperado de los retardos extremo a extremo experimentados por las ráfagas, esto se puede interpretar en el nivel TCP como una posible "no respuesta" del receptor (o servidor) ante una determinada acción de tipo *Request()* intercambiada desde niveles superiores de la pila, lo que puede conducir a una acción errónea por parte del nivel TCP, dicha acción puede ser desencadenar procesos de retransmisión o re intento de conexión que no son necesarios.

[34] En la definición formal de la arquitectura de referencia para el conjunto de protocolos TCP/IP se muestran los protocolos de los niveles red, transporte, servicios y aplicaciones pero no aparecen definiciones formales para los niveles de enlace y físico (Comer 1996, p.175)

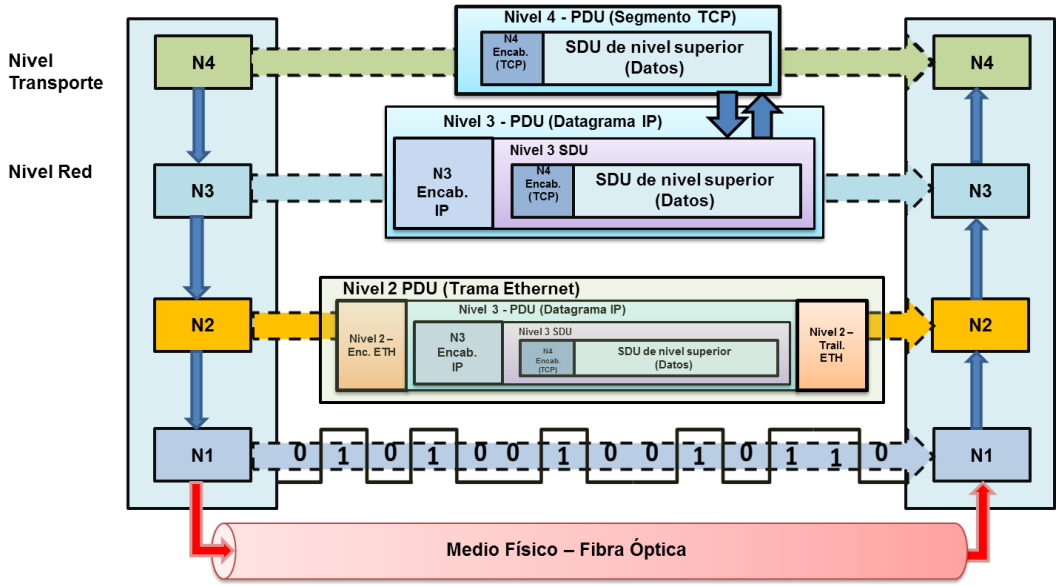


Figura 3.27. Modelo TCP/IP e intercambio de información entre niveles y extremo a extremo

Para mitigar estas acciones es posible mediante el diseño de un *Cross Layer* realizar procesos de comunicación directa entre niveles sin emplear algunas capas intermedias que pueden ocasionar retardos en las respuestas o la necesidad de desplegar acciones que no conducen a una solución rápida a los problemas antes mencionados. Dificultades como éstas han permitido desarrollar diferentes propuestas sobre CL que buscan en principio optimizar los procesos de intercambio de información entre niveles que originalmente pertenecen a una pila de protocolos con enfoque jerárquico.

3.3.3. Taxonomía de Cross Layer

Las formas de crear diferentes propuestas de CL se muestran en la figura 3.28, en las propuestas desde la A hasta la C se ofrece la posibilidad de creación de nuevas interfaces, la mezcla de niveles adyacentes en un “súper nivel”, el acople entre niveles sin crear interfaces nuevas y la calibración vertical entre los niveles de la pila de protocolos mediante la creación de túneles, aunque en la literatura pueden encontrarse otras opciones.

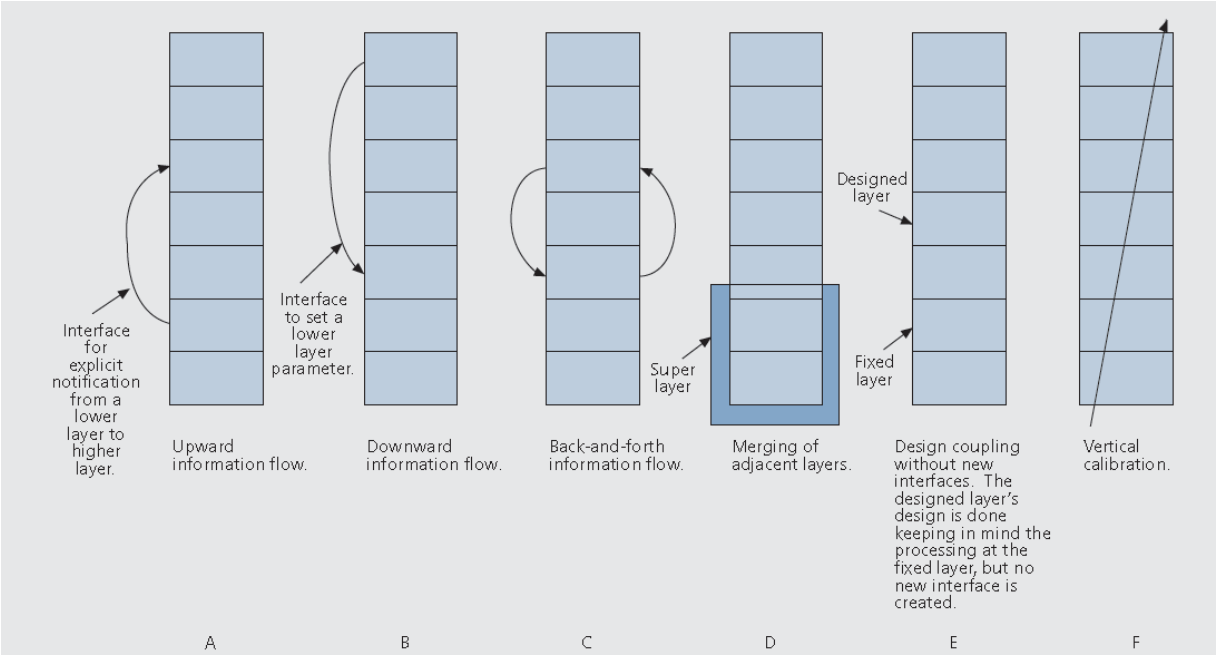


Figura 3.28. Diferentes opciones de CL, considerando que las representaciones rectangulares son arquitecturas o pilas de protocolos en niveles

Como se observa en esta primera clasificación, las opciones de diseño CL conservan su arquitectura en capas, es posible ver que existen propuestas donde se rompe por completo el modelo jerárquico y se proponen conexiones en ciclo o por medio de niveles verticales.

Continuando con la figura 3.28, cuando se crean o proponen nuevas interfaces de comunicación entre las capas del modelo, éstas pueden usadas para compartir información entre las capas existentes en tiempo de ejecución, se debe tener cuidado de no perder el sentido de la modularidad en el diseño, se recuerda que la modularidad consiste en contar con el menor número de interfaces entre niveles a fin de evitar afectarlo en su totalidad si por ejemplo una falla sucede solo en una de las capas.

Según como fluye la información entre los niveles se presentan tres categorías: flujo de información hacia arriba (*upward flow*) es decir desde niveles inferiores hacia niveles superiores, flujo hacia abajo (*downward flow*) desde niveles superiores hacia niveles inferiores y flujos de información hacia adelante y hacia atrás (*back and forth*).

En seguida se describen algunos ejemplos de estas categorías.

- **Flujo de información hacia arriba (***upward flow***)**, en este caso un protocolo de alto nivel que requiere alguna información desde un nivel o niveles inferiores en tiempo de ejecución lo cual resulta en la creación de una nueva interfaz entre el (los) nivel (es) inferior(es) hacia el nivel superior (figura 3.28 A). Por ejemplo, en un conexión TCP-TCP extremo a extremo establecido a través de una red OBS (o WROBS) en el cual el desempeño de esta subred puede inducir a un comportamiento erróneo del emisor TCP sobre el estado real de la red en cuanto a congestión. Si se crean interfaces desde los niveles OBS que se comuniquen directamente con el nivel de transporte (TCP) mediante el empleo de notificaciones explicitas, este problema de la mala interpretación de lo que ocurre en la red OBS puede eventualmente solucionarse. Igualmente, si en realidad se presenta el caso de la posible ocurrencia de congestión en la subred (OBS) desde la cual se puede enviar una Notificación explicita de Congestión hacia arriba o UECN (*Upward Explicit Congestion Notification*) originada en el plano de control de la red OBS hacia el nivel de transporte para evitar que el desempeño a nivel TCP comience a degradarse.

- **Flujo de información hacia abajo (***dowmward flow***)**, algunas veces se requiere el diseño de CL que envíen información a través de una nueva interfaz directamente a niveles inferiores como se muestra en la figura 3.28 B. Como ejemplo puede citarse el caso en que el nivel de aplicación se comunique con la subred para comunicarle que está ejecutando una aplicación que presenta ciertos requisitos respecto a los retardos que puede soportar, en este caso la red OBS como red subyacente, debe tratar dichos paquetes como sensibles a retardos y puede ajustar el tráfico entrante al nodo frontera de ingreso (*edge Ingress Node*) mediante la asignación de prioridades a los paquetes y empleando el esquema de ensamble basado en tiempo $\boldsymbol{T}$ en lugar de emplear algoritmos orientados a manejo de longitud o umbral de ráfaga $\boldsymbol{B}$.

  En resumen, los procesos de comunicación hacia arriba permiten notificar a los niveles superiores sobre las condiciones presentes en la subred. Igualmente, para el caso de flujo de información hacia abajo se emplea como medio para alertar o

indicar a los niveles inferiores sobre cómo deben ser procesadas o atendidas las aplicaciones que están siendo soportadas por el sistema de red.

- **Flujo de información hacia adelante y hacia atrás (*back and forth*),** dos niveles que realizan tareas diferentes pueden colaborar con otros en tiempo de ejecución, se crea un lazo entre estos niveles, como se muestra en la figura 3.28 C. En este caso se crean nuevas interfaces que realizan actividades complementarias.

- **Mezcla de niveles adyacentes**, de esta forma se puede crear un súper nivel, esto se logra juntando los servicios que prestan dichos niveles por separado, este proceso no requiere la creación de nuevas interfaces, pero si reajustar las existentes. Un ejemplo puede ser unir funcionalidades de los niveles inferiores de OBS o tratar de juntar niveles IP y OBS, aunque esto requiere de un análisis más detallado ya que se puede necesitar de un rediseño de alguno de ellos (niveles OBS o niveles TCP/IP).

- **Calibración vertical**, una de las propuestas finales apunta al diseño de CL mediante el ajuste de parámetros que se propagan entre los diferentes niveles, como se observa en la figura 3.28F, básicamente el desempeño se observa al nivel en el cual la aplicación es función de todos los parámetros que se encuentran en los niveles inferiores. Esto puede ser visto como la oportunidad para que en conjunto sintonicen todos los parámetros para lograr un mejor desempeño que si se hubieran calibrado por separado, ya que su concepción inicial muestra que los protocolos que intervienen en una comunicación realizan su labor independiente de los demás protocolos.

  Esta clase de calibración puede hacerse estática o dinámica, en el primer caso se procede a la definición inicial o inicialización de los parámetros al momento de comenzar la operación de la red o en el tiempo de diseño, en el segundo caso, la **calibración vertical dinámica** se hace en tiempo de ejecución el cual emula una pila de protocolos flexible que responde a variaciones en ciertos niveles críticos de la red, como pueden ser la variación en el canal físico (por los efectos lineales y no lineales), el tráfico de la red (aumento o disminución y en ráfagas), y las condiciones generales en la operación de la red (OBS).

La **calibración vertical dinámica** requiere de mecanismos para recuperar y actualizar los valores de los parámetros los cuales son optimizados desde los diferentes niveles. Esto puede implicar aumento de costo en términos de sobre encabezamientos e imponer requerimientos estrictos sobre los parámetros recuperados y actualizados para brindar la seguridad sobre el conocimiento del estado de la pila de protocolos es decir que esté actualizado y sea preciso.

3.3.4. Interacción entre niveles y entes en un *Cross Layer*

Adicionalmente a los esquemas revisados, en la figura 3.29 se muestran tres (3) arquitecturas propuestas inicialmente para redes inalámbricas, aunque también pueden ser empleadas en redes cableadas tipo OBS. En este caso los procesos de operación e intercambio de información entre los módulos se describen en seguida.

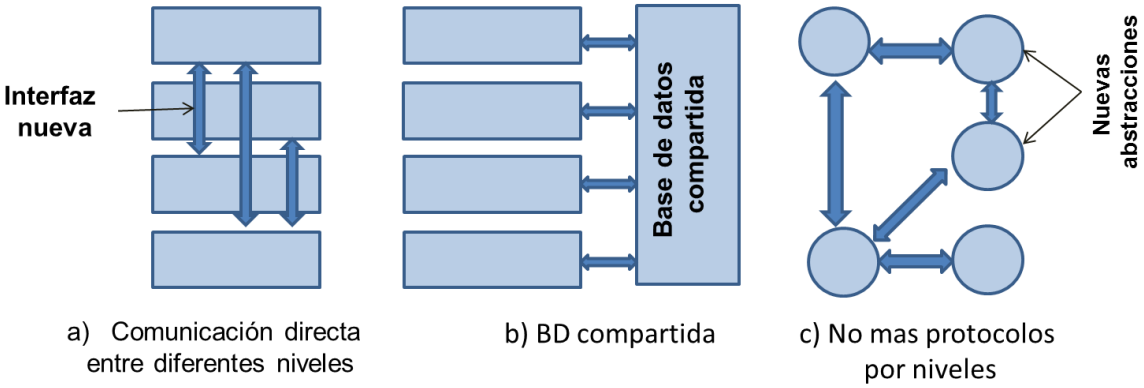


Figura 3.29. Propuestas de diseño CL con nuevos enfoques

- **Comunicación directa entre niveles**, como se muestra en la figura 3.29 a), este es el caso que se presenta al emplear calibración vertical dinámica donde las variables de un nivel se hacen visibles a otro nivel en tiempo de ejecución, en contraste con las arquitecturas tradicionales donde cada nivel maneja sus propias variables y tienen que ser conocidas por los demás niveles. Se han definido muchas formas mediante las cuales los niveles pueden comunicarse unos con otros, por ejemplo, los encabezamientos que se incluyen de las unidades de datos intercambiadas entre niveles pueden ser empleadas para flujo de información entre niveles (envío de datos rápidos, por ejemplo), como se muestra en la propuesta de Deering & Hinden (1998).

Alternativamente, la información extra entre niveles puede ser tratada como paquetes internos a la arquitectura empleada. En Wang & Abu-Rgheff (2003), se presenta un estudio comparativo entre diferentes propuestas de CL y se muestra además una opción denominada señalización CL mediante atajos CLASS (*Cross Layer Signaling Shortcuts*), en esta propuesta dos niveles cualquiera ubicados en diferentes partes de la pila de protocolo pueden comunicarse unos con otros directamente, esto puede lograrse mediante la creación de túneles (*pipes*) entre niveles, o mediante el empleo de memorias compartidas las cuales implican mecanismos de uso de dichos recursos.

Como se comenta hasta el momento, al realizar la implementación del CL se proponen diferentes mecanismos para lograr el intercambio acertado de información entre los diferentes niveles que componen la arquitectura (antes jerárquica), en seguida se hace una descripción de la aproximación al diseño CL mediante la compartición de una base de datos entre los diferentes niveles.

- **Base de datos BD compartida entre niveles**, una propuesta que ha ganado muchos adeptos se muestra en la figura 3.29 b) donde se incluye una base de datos a la cual tienen acceso todos los niveles de la pila de protocolos, desde un punto de vista del diseño, esta puede verse como un nivel adicional que provee servicios como almacenamiento y envío de información desde y hacia todos los niveles. En muchos diseños que se presentan incluso cuando se proponen arquitecturas cognitivas *Cross Layer* se plantea la inclusión de un nivel que por lo general se muestra como un nivel vertical (similar a los empleados para realizar gestión de red – modelo de plano vertical) y se considera una buena forma de realizar calibración vertical entre niveles. Se debe entonces pensar en el diseño de nuevas interfaces para la interacción con este nuevo nivel, el verdadero reto de esta clase de diseño CL es la interacción entre los diferentes niveles y la base de datos compartida. En la figura 3.30, se observa una mejor aproximación a esta clase de diseño CL, se destacan las interfaces entre niveles y la posible información que puede ser intercambiada entre niveles a través de la base de datos BD compartida.

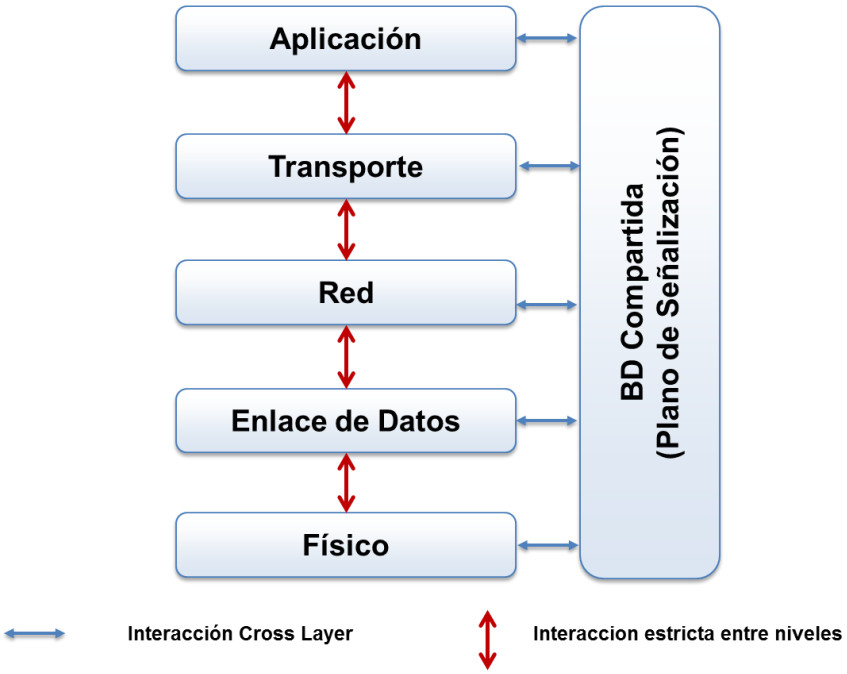


Figura 3.30. Modelo general de CL (*Cross Layer*) con Base de Datos BD compartida

Finalmente, en la figura 3.29 c) se observa cómo pueden proponerse nuevas abstracciones de posibles desarrollos de CL, en este caso desaparecen las configuraciones como pila de protocolos y la interdependencia entre los nodos puede ser alta, sin embargo estas nuevas propuestas tendrán que realizar un largo recorrido para convertirse en estándares ya que su desarrollo o aplicación puede depender mucho de un sistema en particular.

3.3.5. Retos futuros para diseños orientados a *Cross Layer*

Hasta el momento se ha hecho la descripción de cómo implementar las interacciones entre los diferentes niveles o elementos que componen un CL. En seguida y acorde con la literatura revisada, se presentan algunos interrogantes que se están intentando resolver por la comunidad investigativa:

- Cómo pueden coexistir las diferentes propuestas CL?.
- Cómo los distintos modelos de CL pueden estar preparados para los cambios futuros?
- Cuáles modelos de CL tienen mayor impacto en el desempeño de las redes?

- Cuál es el nivel de rigurosidad que se debe tener para conocer las diferentes interacciones entre los parámetros intercambiados entre los diferentes niveles?
- Pueden los diferentes modelos de CL adaptarse a las condiciones del entorno de red y a las distintas clases de redes?
- Es posible estandarizar los mecanismos o interfaces que surgen entre los diferentes niveles de la arquitectura?

Al tratar de responder algunos de estos interrogantes, se puede anotar lo siguiente:

- Aunque en la literatura se muestran muchos modelos CL no es claro aún si existe la opción de que uno de ellos sea más importante que los demás. Se propone por algunos autores realizar un análisis minucioso en términos de complejidad de la implementación versus mejoras en el desempeño. Se puede comenzar analizando el grado de interactividad entre los niveles que se quieren conectar, Shakkottai, Rappaport & Karlsson (2003) muestran como el diseño de notificaciones explícitas mediante nuevas interfaces hacia el nivel de transporte mejoran el desempeño extremo a extremo de la red. En general este aspecto está abierto a la investigación y pueden sugerirse nuevos trabajos donde se analicen o definan métricas más exactas para catalogar las diferentes propuestas de CL.

- En cuanto a la coexistencia de los diferentes CL, la pregunta implica que si es posible que una vez se haya desarrollado un CL y posteriormente otro CL y que ésta nueva propuesta pueda convivir con el anterior? La respuesta puede conducir a que primero se debe analizar detenidamente el desarrollo o propuesta más antigua para revisar si es posible removerlo y reemplazarlo por uno nuevo o si puede interactuar con el existente, una especie de compatibilidad hacia atrás.

  Igualmente, existen algunos casos en los cuales los diseñadores deben establecer con mucha claridad las condiciones de la red (internas y externas) que se deben presentar para que determinado CL que se haya propuesto pueda tener una incidencia directa en las mejoras sobre el desempeño del sistema. De esta manera es posible decidir si se emplea un CL o no y en caso afirmativo cuando hacerlo. En caso de seleccionar un CL es necesario definir mecanismo eficientes en cuanto a manejo de tiempos ya que estos interactúan con la pila de protocolos y son los encabezamientos los encargados de servir como elementos de

transporte a tener en cuenta, la intención es no aumentar los tiempos al agregar parámetros y otros niveles, se busca en los posible minimizar los retardos.

- De otro lado, partiendo del hecho que al definir las arquitecturas tradicionales, éstas tienen estandarizadas sus interfaces y los diferentes parámetros que intercambian entre sí, ahora, en las propuestas CL sobre las arquitecturas tradicionales se violan las definiciones hechas, de esta forma resulta complejo determinar cuál debe ser la nueva arquitectura de referencia. Igualmente, se debe definir cuales deben ser las fronteras entre los módulos, entre niveles, entre otros aspectos.

  El éxito en la propuesta de CL depende de la organización que se le dé a los módulos (ubicación de los niveles si los hay) y las interfaces entre ellos pueden determinar la eficiencia de la información intercambiada entre ellos y que clase de sobre encabezamientos son necesarios al igual que los retardos soportados al compartir información CL. Esto determina cuan eficiente y dinámicamente se intercambia o comparte información, si se emplea calibración vertical es necesario considerar el impacto de los retardos en recuperar o actualizar la información que permite mejorar el desempeño de la red.

3.3.6. Intercambio de Información en modelos *Cross Layer*

El desarrollo por aproximación al diseño *Cross Layer* permite a los niveles superiores una mejor adaptación de sus estrategias de operación para hacer variar las condiciones de los niveles inferiores (por ejemplo niveles de enlace y red), igualmente, también muchos autores consideran que el uso de un CL permite mejorar el desempeño extremo a extremo para un conjunto dado de recursos en una red.

En una arquitectura de comunicaciones cada nivel se caracteriza por poseer un grupo de parámetros claves, los cuales son enviados a los niveles adyacentes para ayudarlos a determinar los modos de operación que puede ayudar a mejorar ya sea el canal de datos, condiciones de la sub red y las aplicaciones soportadas.

En general, se sugiere en principio que la infraestructura de diseño CL según la aproximación seleccionada (tomado de la taxonomía CL) deba mantener la aproximación al modelo tradicional en niveles pero el intercambio de información entre los niveles en conjunto debe optimizar el desempeño de la red. Para esto se hace necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

1. Realizar una abstracción de los niveles involucrados en la comunicación, para lo cual se deben capturar los parámetros que tienen una mayor influencia sobre los otros niveles.

2. Identificar la información de tipo *Cross Layer* que debe ser intercambiada entre los niveles.

Se hace necesario también implementar los protocolos de adaptación en cada nivel empleando para esto la información que se debe intercambiar entre los niveles involucrados en la comunicación.

En este caso puntual, es necesario identificar la información que en condiciones de no CL se intercambia entre los niveles TCP e IP y la sub red, así como la información que puede ser intercambiada entre OBS y los niveles superiores. Se recuerda que en este caso, se trata con la combinación de TCP/IP sobre OBS. En esta aproximación, la subred es OBS y los mecanismos que pueden afectar a TCP e IP pueden ser las medidas de desempeño o QoS (retardo y bloqueo de ráfagas). Para brindar un mejor servicio a los niveles superiores se realizan acciones de optimización de los algoritmos de planificación, rutas empleadas, y número de usuarios permitidos en la red entre otros aspectos.

En particular TCP es un protocolo punto a punto que configura una conexión entre dos extremos (*host* local y *host* remoto) para lo cual emplea señales de reconocimiento para indicar el establecimiento de la conexión. Respecto a la forma como TCP reacciona ante posibles problemas que se presenten en los niveles inferiores, contiene mecanismos que le permiten controlar el flujo de información ante congestión en la red, realiza continuos cálculos respecto al tráfico presente y el tráfico esperado, dependiendo de la diferencia entre estos valores realiza ajustes en la ventana de congestión.

La tabla 3.3 muestra un resumen de la información que se puede intercambiar por nivel de la arquitectura formal Internet.

Nivel	Información
Aplicación	Algoritmo de control de la topología, localización de los servidores, mapa de la red.
Transporte	Ventanas de control de congestión, retardos y *timeouts*, pérdida de paquetes.
Red	Afinación del enrutamiento, duración de las rutas, enrutamiento múltiple.
Enlace MAC	Ancho de banda del enlace, calidad del enlace, retardo de trama MAC.
Físico	Localización de los nodos (en caso de redes móviles), patrones de movimiento, relación señal a ruido, entre otros.

Tabla 3.3. Información susceptible de ser empleada en CL

3.4. Desarrollo de las propuestas

Con los elementos estudiados, los comentarios en las distintas secciones sobre el desarrollo de la Tesis y cada concepto analizado, se procede al diseño de las diferentes propuestas que forman parte del segundo objetivo dentro del anteproyecto aprobado para esta Tesis.

Igualmente, para obtener una propuesta confiable que pueda ser evaluada en el futuro y que se acomode a posibles cambios y adaptaciones, es importante contar con tres (3) aspectos básicos, el primero de ellos tiene que ver con la definición de los mecanismos de Calidad de Servicio en redes OBS, el segundo aspecto tiene que ver con la definición de una arquitectura de red cognitiva que sirva de referencia para realizar pruebas y el tercero es definir un modelo de *Cross Layer* para una red OBS y para una posible interacción entre TCP/IP y OBS. En seguida se amplían estos aspectos:

- **QoS en OBS**: en principio se deben considerar los elementos de calidad de servicio QoS que serán empleados como criterios de medida del desempeño de

la red OBS, existen en la literatura diferentes opciones para abordar este aspecto, aunque la propuestas definidas no están diseñados para redes OBS, por lo tanto se propone una arquitectura de QoS que basado en un modelo aplicado a redes ATM pueda servir de referencia para evaluar la calidad de servicio en esta clase de redes.

- **Arquitectura de red Cognitiva:** en seguida se deben conocer los diferentes componentes de la arquitectura cognitiva aplicada a una red OBS, con elementos tomados de las diferentes propuestas estudiadas tanto de los procesos cognitivos humanos como de los procesos de cognicion enfocados hacia redes de comunicaciones, se propone una arquitectura de red cognitiva que pueda ser aplicada no solo a esta clase de redes, sino a cualquier red de comunicaciones.

- ***Cross Layer***: Después se propone una infraestructura de red en principio *Overlay* (aunque se puede intentar trabajar con los modelos aumentado y *peer*) que puede soportar la interacción TCP/IP sobre OBS e integrar las dos arquitecturas anteriores para obtener una propuesta acorde con el segundo y tercer objetivo de la Tesis. Igualmente, se propone un modelo CL para la red OBS entre las diferentes capas que forman parte de su arquitectura de protocolos.

Como resultado se espera contar con modelos preliminares (que incluyen los conceptos de QoS, Cognición y *Cross Layer*) que sirven de referencia para el diseño de los escenarios de simulación que se desarrollan en el Capítulo 4.

3.4.1. Propuesta de una Arquitectura para QoS

3.4.1.1. Ambientación

Cuando se definen los requerimientos de las redes de comunicaciones, se habla en principio sobre las metas de desempeño que se trazan al momento de acotar o definir sus requerimientos. Elementos como la capacidad o ancho de banda disponible en la red, disponibilidad de recursos, utilización óptima de los recursos disponibles, cantidad de información libre de error transmitida (*throughput*[35]) por

[35] En adelante se sigue denominando como *throughput* por ser más conocida en lugar de su traducción al español.

segundo (ver figura 3.31), carga ofrecida a la red por la totalidad de los nodos en un momento determinado, precisión, eficiencia, retardos (latencias), variaciones de retardo, respuestas en tiempo. En el Apéndice H se encuentra una definición con mayor detalle de estos elementos dada importancia al momento de realizar el diseño de una red OBS.

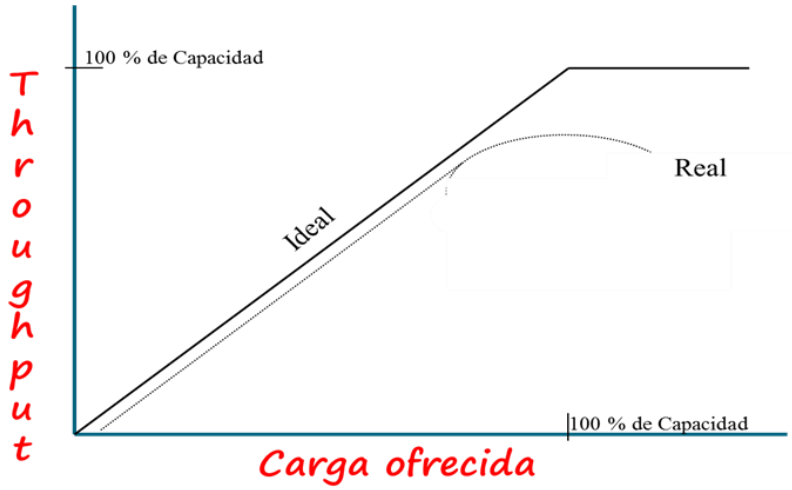


Figura 3.31. Carga ofrecida versus *throughput*

Igualmente se debe tener en cuenta que existen una serie de factores que impiden un mejor desempeño de las redes respecto al *throughput*, estos factores son: relación de errores extremo a extremo, funciones de los protocolos (envío y recepción de mensajes, establecimiento de conexiones, acuses de recibo), parámetros de los protocolos (tamaño de tramas, ráfagas, métodos de ensamble en redes OBS, tiempos de retransmisión, eficiencia en el tamaño de las unidades de datos de protocolos (ráfagas pequeñas menos eficiente, ráfagas grandes mayor eficiencia), métodos de control de errores), pérdida de paquetes o ráfagas y otros factores de operación de los terminales de datos (computadores o *host*).

Los retardos y la variación de los mismos por lo general ocupan un lugar importante cuando se trata de evaluar el desempeño de una red en cuanto al *throughput*. En principio las causas de los retardos caen en el campo de la física, en las redes ópticas (y otras redes alambradas) se toma como referencia la velocidad de la luz en el vacío $c =$ (3x10^{8}m/s), y aunque la velocidad en la fibra es aproximadamente dos terceras partes de la velocidad de la luz en el vacío ($^2/_3\ c$), algunos diseñadores

consideran que los tiempos de propagación de la luz en los enlaces de fibra son despreciables (algunas medidas muestran tiempos de propagación de 1ms por cada 200km).

Asimismo, en la generación de los retardos influyen los tiempos que demoran los procesos de conmutación de paquetes, como se recuerda, en las redes OBS se cuenta con un BCP que es tratado de esta forma, el BCP se genera en los nodos de borde y se envía mediante procesos de almacenamiento, procesamiento, regeneración y reenvío, por lo anterior el BCP se ve sometido a procesos de encolamiento en los nodos centrales originando retardos, la relación existente entre el tamaño de la cola o profundidad de la misma versus la utilización del ancho de banda disponible, la figura 3.32 muestra una gráfica que relaciona estas variables. Sin ser muy exhaustivo el análisis de teoría de cola se evidencia el crecimiento exponencial respecto al número de paquetes en la cola en la medida que aumenta el empleo del ancho de banda.

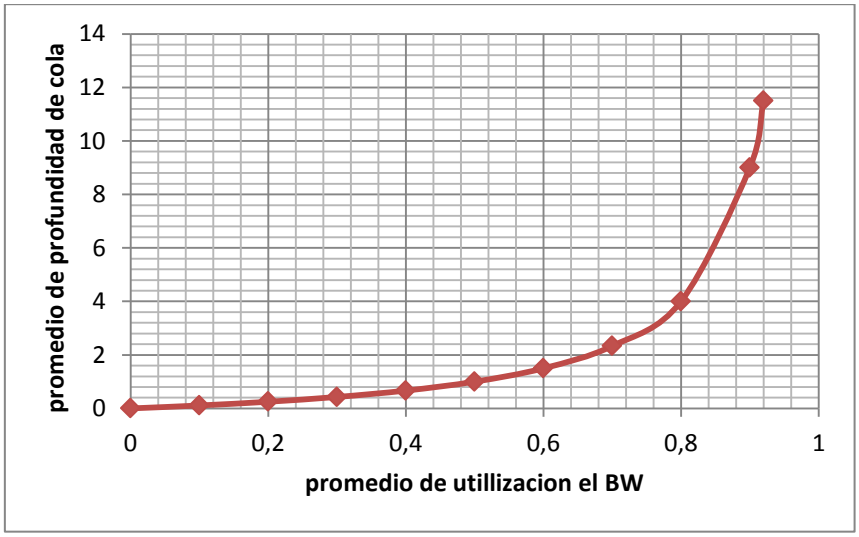


Figura 3.32. Profundidad de encolamiento y utilización del ancho de banda

Cuando se trabaja con redes OBS centralizadas, el proceso de encolamiento de los mensajes tipo *Request* () en el nodo de control central puede seguir un tratamiento similar al del BCP en redes OBS con nodos distribuidos. Para esta clase de redes entre mayor sea el tamaño de las mismas mayores pueden ser los tiempos de espera y los retardos en la comunicación ya que el nodo de control debe procesar todas las solicitudes provenientes de los nodos que conforman la red.

En el caso de las ráfagas de datos o DB, el tratamiento es diferente ya que una vez que la ráfaga ha sido convertida al dominio óptico no se realizan procesos de conversiones O-E-O sobre ellas, en este caso su influencia sobre el *throughput* se debe a la posible ocurrencia de contención en los nodos centrales,

Otros aspectos a tener en cuenta es la seguridad, en las redes ópticas se han definido algunos mecanismos de seguridad para tener en cuenta tanto en la infraestructura física como en el transporte de la información, para el caso de las redes ópticas OBS se pueden aplicar mecanismos de seguridad similares a los definidos en las redes tradicionales por conmutación de paquetes con sus acotaciones correspondientes.

Aspectos como confidencialidad, integridad y disponibilidad de los datos, deben ser considerados al definir requisitos de seguridad en esta clase de redes. Un listado de metas en este sentido puede ser:

- Acceso restringido a datos internos propios del sistema de red. Se permite acceso a datos a través de la web pública y a los servidores FTP (*File Transfer Protocol*).

- Empleo de accesos por autenticación y autorización a los operadores de la red.

- Detección de intrusos y aislar los daños hechos por los mismos.

- Solicitud de autenticación cuando se actualizan las tablas de enrutamiento especialmente cuando se recibe información desde otros nodos de la red.

- En una conexión sobre OBS nativo, es posible prestar el servicios de VPN ante lo cual es necesario restringir acceso a la red establecida. De otro lado si se trata de IP sobre OBS lo mejor es usar el servicio VPN de las redes IP (protocolo IPsec por ejemplo).

- Ubicación segura de los equipos físicos nodos de borde y OXC en un lugar acondicionado y protegido.

- Transporte de información confiable mediante el empleo de mecanismos o algoritmos de cifrado de datos (*data encryption*), esto puede hacerse una vez se

haya ensamblado la ráfaga y antes de su conversión al dominio óptico puede someterse a un nodo de cifrado, igual se puede proceder con el BCP. Aunque esto puede aumentar el retardo extremo a extremo se sugiere que puede explorarse con mayor detalle ante la evidencia diaria de obtención fraudulenta de información. En la literatura se encuentran algunos trabajos al respecto, pero hasta ahora no existe una propuesta sobre seguridad en redes OBS consistente. Este es un tema que el autor considera se puede abordar con métodos cognitivos en los nodos tanto de borde como centrales, las ideas se plantean con mayor detalle en el Capítulo 5.

- Las políticas de seguridad generales para los empleados de las empresas.

Los elementos de seguridad, confiabilidad, disponibilidad entre otros tienen relación con la totalidad de la red OBS que se desea diseñar, existen diferentes métricas para abordar la QoS y una de ellas tiene que ver con los nodos que componen la red, aunque por lo general no se incluyen los enlaces WDM que unen los nodos de la red OBS, estos pueden influir en el desempeño total de la misma.

Para efectos de las propuestas siguientes y los escenarios de prueba o modelos de simulación del Capítulo 4 en enlace por fibra se considera ideal. Esta consideración puede ser válida debido a los avances tecnológicos que se dan día a día en este campo que permiten la construcción de fibras ópticas que cada vez más mitigan los inconvenientes ocasionados por los efectos lineales y no lineales en un enlace con uno o múltiples *span*, se logran transmisiones en redes de área extensa WAN y *long haul* con muy bajas pérdidas y sin la necesidad de incluir elementos de amplificación y regeneración por cientos de kilómetros. Una clase típica de fibra puede ser la SMF-28 ULL de la empresa Corning® con atenuación máxima de 0.17dB/km a 1550nm, por mencionar un producto comercial. Adicional a lo anterior se busca que las redes ópticas sean más transparentes y seguras, este aspecto se relaciona con:

- Reducción de las conversiones O-E-O.
- Empleo del procesamiento de señales ópticas para realizar la conversión de longitudes de onda y tratar de disminuir costos y posibles retardos en este proceso.
- Convergencia entre redes ópticas en la prestación de diferentes servicios.

- La red óptica puede ser la red convergente para servicios fijos y móviles.
- Aseguramiento de calidad de servicio en el nivel óptico.
- Desarrollo de esquemas de seguridad para las redes ópticas, en los planos de control, de datos y especialmente en el nivel óptico físico.

Igualmente, se busca hacer que las redes ópticas sean más dinámicas y cognitivas, esto se puede lograr mediante:

- Conmutación completamente óptica (planos de control y datos), esto conduce a una mayor independencia de las tecnologías electrónicas.

- Establecimiento, monitoreo y gestión de conexiones de forma automática y dinámica, mecanismos de control de fallas y restablecimiento autónomos, gestión de tráfico según la demanda de los usuarios. Esto se puede lograr mediante la inclusión de métodos cognitivos en los nodos de la red y en sus sistemas de gestión.

- Se busca diseñar e implementar una red óptica confiable lo que implica que debe controlar sus propios recursos mediante procesos de autoaprendizaje en tiempo de operación y autodescubrimiento de los recursos disponibles.

- Mejor uso de los recursos de red, esto se logra mediante reconfiguraciones automáticas, definición de los recursos necesarios evitando sobre aprovisionamiento, empleo de algoritmos de enrutamiento nuevos o mejorar los existentes mediante técnicas meta heurísticas. Empleo de tecnologías a nivel físico adaptables que trabajen con el máximo ancho de banda posible.

- Conseguir que los enrutadores ópticos sean escalables, que permitan el soporte multigranular de servicios, es decir que se cuente con elementos de redes modulares y flexibles.

En resumen se busca una red óptica que en lo posible opere autónomamente, para lograrlo se debe impulsar el desarrollo del campo en redes ópticas cognitivas las cuales para desplegar su cognición lo puedan hacer mediante diseño orientado a *Cross Layer*. Igualmente, los elementos tratados en esta sección en conjunto con

aspectos de gestión de red, contribuyen al logro de las metas extremo a extremo definidas cuando se trata el diseño de redes por conmutación óptica OBS.

- **Relación QoS y costos de la red**

La figura 3.33 muestra la relación entre la calidad de servicio ubicada en la cúspide de la pirámide y los conceptos de CAPEX y OPEX, en esta figura la definición de QoS se hace desde la perspectiva de la redes TCP/IP sin embargo resulta valida dada la importancia de esta suite de protocolos en la actualidad.

Se busca tener un equilibrio que permita brindar una QoS extremo a extremo que cumpla con las expectativas de los usuarios percibidas mediante la medida de la Calidad de Experiencia QoE (*Quality of Experience*), según su definición en la QoE incluye la totalidad de efectos del sistema de comunicaciones extremo a extremo (cliente, terminales de acceso, red de acceso, red transporte, infraestructura de servicios, modelos de gestión).

Figura 3.33. Relación CAPEX, OPEX y QoS

Para lograr una reducción de los costos de operación OPEX de una red OBS WAN pueden tenerse en cuenta las siguientes metas técnicas:

- Emplear protocolos de enrutamiento y asignación de longitudes de onda a través de la red OBS que puedan minimizar en lo posible el tráfico cursado. Las propuestas de métodos cognitivos apuntan a este ítem.

- Se busca optimizar el uso de los recursos disponibles en la red OBS, la solución propuesta sobre métodos cognitivos se aplica a este aspecto.

- Uso controlado de conversores de longitud de onda.

- Uso controlado de mecanismos de control de contención.

- Así como se propone empleo de mecanismos de seguridad en redes OBS es posible introducir mecanismo de compresión de datos en estas redes, se debe entonces buscar y probar algunos algoritmos de compresión a los cuales se puede someter la ráfaga de datos.

- Como OBS opera sin recurrir a mecanismos de almacenamiento (*bufferless*) los costos se reducen tanto en CAPEX como en OPEX. Y redunda en el aumento del *throughput*.

- En cuanto a las tecnologías disponibles para la implementación de los nodos de las redes OBS, debido a su naturaleza y mientras no existan soluciones para el almacenamiento óptico de información, estos nodos operan en los dominios electrónico y óptico. Se busca contar con las mejores tecnologías en lo electrónico, como el empleo en redes de comunicaciones de la VLSI (*Very Large Scale Integration*) con bajo consumo de potencia y muy alta escala de integración. Igualmente, se propone el empleo de tecnologías CMOS en los *transceivers* operando por encima de los 10Gbps.

  Para el compnente óptico de los nodos OBS, se busca contar con tecnologías OSF (*Optical Switch Fabric*) con tiempos de conmutación bajos, de esta forma los OXC (*Optical cross Connect*) cuentan con características de Multi-Granularidad (Zervas *et al.* 2009), conmutadores MEMS cuentan con tiempos de conmutación

de 10ms a 10Gps con datos de 200ms de duración mientras los SOA (*Semiconductor Optical Amplifier*) emplea tiempos del orden de los nanosegundos. La multi-granularidad permite usar tecnologías MEMS por ejemplo para el plano de control y SOA para el plano de datos de la red OBS (por ejemplo se puede contar con un canales de control operando a 2.5Gbps en el plano de control y de 40 o 100Gbps en el plano de datos). Finalmente, una mejor tecnología evita problemas de operación, disminuye consumo de potencia, ayuda mejorar los procesos de transporte de información, disminuye retardos extremo a extremo, pueden usarse mejor los recursos de la red y por lo tanto atender más usuarios. Todo esto redunda en disminución de los costos OPEX.

Como se observa existe una variedad de parámetros que pueden tenerse en cuenta cuando se define la calidad de servicio en redes OBS, en seguida se hace un resumen de los mismos y como aplicarlos en redes OBS.

3.4.1.2. QoS en OBS

Chua *et al.* (2007) muestran como los mecanismos de QoS se pueden categorizar en mecanismos para **mejorar** la QoS y mecanismos para **provisión** de QoS. Siguiendo esta clasificación se definen los mecanismos que forman parte de la Calidad de Servicio en la redes OBS.

- **Mecanismos para mejorar la QoS**

  De la arquitectura de una red OBS se conoce que está constituida por nodos de borde o de frontera y nodos centrales o de núcleo. Cuando se trata con mecanismos para mejorar la QoS se definen desde la perspectiva de los nodos (*Node-Based*), teniendo en cuenta las funciones que realizan los mismos (Praveen *et al.* 2006).

- **Mecanismos de QoS diferenciados por nodos:**

Inicialmente, se admite que las técnicas para gestionar QoS en los nodos de una red OBS se pueden resumir de la siguiente forma:

Nodos de Borde (*edge nodes*):

- Variación de los parámetros y técnicas de ensamble de ráfagas.
- Diferenciación de servicios mediante control del *offset*.
- Encolamiento y clasificación basada en clases (y prioridades).

Nodos centrales (*core nodes*):

- Técnicas de control de contención (*dropping*).
- Planificación con prioridad de los BCP.

En otros componentes y funcionalidades de la red OBS:

- Señalización: QoS absoluta en reserva de longitudes de onda (en OBS y WROBS).
- Enrutamiento con QoS.
- Control de admisión: se puede aplicar en los nodos de borde y centrales.
- Diferenciación por Clases de Servicios (emergencia, bajos retardos y bajas perdidas, altas prioridades*, best effort*, contenedores de datos).

Debido a la importancia de contar con elementos solidos de QoS para OBS, se realiza en seguida una descripción con mayor detalle.

1. **Proceso de ensamble de ráfagas**: en este caso la diferenciación se realiza teniendo en cuenta la longitud de la ráfaga (Klinkowski *et al.* 2005) y el esquema se denomina diferenciación por longitud de ráfaga BLD (*Burst Length Differentiation*). Los mecanismos de ensamble de ráfagas por tiempo y por umbral de longitud tienen un impacto directo en el tamaño de las ráfagas que transitan por la red OBS y por lo tanto influyen en la provisión de QoS extremo a extremo, el mecanismo por tiempo permite el ensamble de ráfagas de distinta longitud, mientras que el segundo emplea un valor definido, en este segundo se debe observar adecuadamente la definición del umbral $\boldsymbol{B}$ (y el B_{min}). Lo anterior permite asignar ráfagas de distintos tamaños para diferentes clases de tráfico de esta forma se puede también resolver la contención y garantizar la QoS deseada. De aquí se desprenden los procesos de ensamble priorizado que permite almacenar en una ráfaga tráfico con diferentes prioridades con la intención de ayudar en la solución de contención al momento de hacer segmentación de ráfagas (Jue & Vokkarane 2005).

Es decir cuando ocurre la contención los datos de baja prioridad son descartados y se continua con los de alta prioridad. Igualmente, para aprovechar mecanismos de planificación con *Void Filling*, se busca colocar los paquetes con más alta prioridad en el medio de la ráfaga y los de baja prioridad al comienzo y al final, esto debido a que se ha demostrado que los datos de los bordes tienen más alta opción de perderse (Sarwar *et al.,* 2008). Otros esquemas proponen realizar descarte intencional (*Intentional Dropping*) como en Chen, Hamdi & Tsang (2001), Praveen *et al.* (2006). Esto puede ocurrir cuando los requisitos de los servicios en cuanto a retardo son superados por los retardos de la sub red. En otras palabras si ya se vencen los umbrales tolerados no tiene sentido enviar o transportar la ráfaga.

2. **Esquemas de señalización para asignación de recursos**. También llamados esquemas de reserva de recursos. En esta categoría se brinda diferenciación de servicios usando diferentes políticas de reserva para clases diferenciadas. El modelo basado en el tiempo *offset* es uno de los más estudiados. Como se conoce el tiempo *offset* es el que transcurre desde el envío del BCP hasta que se debe enviar la BD, en este tiempo se debe configurar los nodos centrales para que la ráfaga viaje completamente en el dominio óptico.

- **Estimación del *offset***: en principio se debe tener en cuenta el número de saltos, procesamiento del BCP y el tiempo en configurar el OSF. Aspectos como desconocimiento del número de saltos y congestión en la red pueden conducir a un cálculo erróneo del *offset*. Se proponen algunos métodos clasificados en grupos:

  ***Offset* fijo**, se puede calcular con el número de saltos y el tiempo de configuración de los OSF. Este valor puede variar nodo a nodo debido a los posibles retardos de encolamiento de los BCP. Los demás tiempos se desprecian o se toman iguales para todos los nodos.

  ***Offset* estadístico**, se genera aleatoriamente (Verma, Chaskar, & Ravikanth 2000). En redes WROBS el *offset* es la suma del tiempo que demora la respuesta desde el nodo central o planificador central, el tiempo de RWA y el tiempo de señalización de ruta. Algunos métodos de ensamble predictivos no pueden

conocer con exactitud el tamaño de la ráfaga lo cual hace que el BCP se envíe con un valor aproximado del tamaño de la ráfaga lo cual puede tener consecuencias como perder la ráfaga si el *offset* era muy corto o con valores altos que pueden retardar el envío de la ráfaga.

Los mecanismos basados en ***offset*** permiten proveer diferenciación de servicios en términos de probabilidad de perdida de ráfagas al Introducir un extra *offset time* (Qiao & Yoo 1999) para ráfagas con diferentes prioridades. Esto permite a las ráfagas de mayor prioridad una transmisión asegurada. Su valor puede ser calculado como $max(burst\ length) + offset(lower\ class)$, al combinarlo con FDL mejora el desempeño de la red (Yoo *et al.* 2000). Si los tiempos estimados son altos se pueden presentar altos retardo. Para reducir el retardo se ha propuesto un algoritmo que transmite la ráfaga antes que el *offset* termine, este mecanismo sigue en prueba sobre enlaces TCP.

- **Reserva de recursos hacia adelante FRR** (*Forward Resource Reservation*) según Liu, Ansari & Ott (2003) este esquema involucra tres (3) fases: predicción, pre-transmisión y examinación. Se trata de un método predictivo que no introduce retardos extra aunque los procesos de predicción pueden fallar y los recursos reservados no se usaron, esto puede disminuir el uso adecuado de los recursos de la red OBS.

- **Reserva con *Preemption*** (expropiar recursos), este mecanismo quita recursos que están siendo utilizados por ráfagas de baja prioridad solo de ser necesario. Este método tiene muchas variantes en la literatura (Guan *et al.* 2005; Tachibana & Kasahara 2007; Phuritatkul, Ji & Yamada 2007; Marchetto 2008).

- **Agrupación de longitudes de onda** (Zhang *et al.* 2003), este esquema brinda diferenciación de QoS absoluta. Según la prioridad se asignan grupos de longitudes de onda.

3. **Algoritmos de planificación**. La QoS diferenciada se puede proveer asignando diferentes cantidades de ancho de banda a los nodos OBS para diferentes clases de servicios. En este caso una ráfaga con baja prioridad a la cual se le está reservando recursos puede dejarse en espera (sin reserva inmediata) mientras

una ráfaga con mayor prioridad que solicita recursos después puede reservar mientras sucede la espera (Praveen *et al.* 2006), otro mecanismo interesante lo proponen Kozlovsky & Bayvel (2003).

4. **Control de contención**. Esta es la mayor causa para pérdida de ráfagas en las redes OBS, se han propuesto diferentes mecanismos, cada uno de los cuales tiene incidencia sobre la QoS. La tabla 3.4 muestra las políticas de descarte.

Política	**Descripción**
Políticas de descarte DP (*Drop Policy*):	La ráfaga que llega a causar contención es descartada.
Política de segmentación y descarte SDP (*Segment and Drop Policy*):	La ráfaga que llega a causar contención gana el recurso, la otra es segmentada o descartada.
Política de deflexión DPP (*Deflect Drop Policy*):	Se aplica a la ráfaga que llega a contender.
Política de segmentar y deflexión SFDP (*Segment first and deflect policy*):	La ráfaga original se segmenta y se aplica deflexión.
Política de deflexión, segmentación y descarte DFSDP (*Deflect first, segment, and drop policy*):	Se aplica deflexión a la ráfaga que contiende si existe un puerto disponible, si no se segmenta y se descartan los segmentos de la cola de ráfaga.

Tabla 3.4. Políticas de descarte, deflexión y segmentación de ráfagas en contienda

Otros mecanismos para control de contención y que ayudan a mejorar la QoS son mediante el uso de FDL para mejorar la QoS o conmutadores SDL (*Switched Delay Lines*). Igualmente, en el proceso de asignación de longitud de onda se puede realizar con y sin conversores de longitud de onda, en el primer caso puede ser fijo, rango limitado y el rango total (Maier 2008), aun se cuenta con limitaciones técnicas y económicas para implementar WC (Teng & Rouskas 2005). La tabla 3.5 resume los

mecanismos para mejorar la calidad de servicio en los nodos OBS cuando se presenta contención.

Mecanismos de control de contención	**Descripción**
Almacenamiento óptico	Al no existir RAM ópticas se emplean piscinas o agrupación de FDL (Sarrazin, Jordan & Heuring 1990; Chlamtac *et al.* 1996; Hunter, Chia & Andonovic 1998), se usan líneas de fibra para retardar la ráfaga. Se emplean arquitecturas *feed forward* y *feed back*. Su efectividad es analizada constantemente.
Deflexión de ruta (*hot potatoe routing*)	Se buscan rutas alternativas y se espera que el nodo hacia donde se hizo la deflexión pueda reenvíe la ráfaga hasta su destino. Se han hecho pruebas en algunas topologías (Chaing *et al.* 2007), la deflexión se puede hacer aleatoria, o con la ayuda de meta heurísticas. Se debe tener en cuenta la longitud del *offset*.
Segmentación de ráfagas	La ráfaga está compuesta de múltiples paquetes IP, estos pueden agruparse por clases y prioridades en la misma ráfaga, al haber contención solo se pierden los segmentos de menor importancia y no toda la ráfaga. En general el *throughput* se ve favorecido con este esquema. (Detti, Eramo & Listanti 2002; Jue & Vokkarane 2005)
Conversión de longitud de onda	Convierte la longitud de onda de una señal de entrada en otra longitud de onda para ser transmitida, las fibras ópticas contienen diferentes longitudes de onda que pueden ser tratadas como canales de transmisión separados. Si el número de longitudes de onda aumenta este método resulta muy atractivo de usar. Si se mide la BLP para 32 longitudes de onda puede ser de $4x10^{-2}$ y de $4x10^{-4}$ con 256 longitudes de onda. (Eramo, Listanti & Spaziani 2005). La conversión puede ser completa, compartida entre nodos, solo

	algunos nodos en la red la poseen, rango limitado de longitudes de onda para su transmisión.

Tabla 3.5.Resumen de mecanismos de control de contención en OBS

En resumen, la tabla 3.6 muestra los mecanismos para mejorar la QoS en OBS, para proveer QoS diferenciada y QoS absoluta. Se agregan algunos mecanismos no descritos hasta el momento.

Mecanismos para mejora de QoS en OBS basados en los nodos	**Mecanismos para proveer QoS diferenciada (relativa)**	**Mecanismo para proveer QoS absoluta**
Planificación de ráfagas	Basados en *offset* (aislamiento de clase)	Basados en *offset*.
Segmentación de ráfagas	Segmentación de ráfagas	Reserva virtual de longitudes de onda
Re-planificación de ráfagas	Probabilísticos Basados en *Preemption*	Basados en *Preemption* (Chaing *et al.* 2007, pp. 96-102)
Planificación ordenada de ráfagas	Planificación del BCP	Descarte temprano de ráfagas por clase ED (*Early Drooping*) $p_{ci}^{ED} = \begin{cases} 0, & p_{ci+1} < p_{c+i}^{MAX} \\ 1, & p_{ci+1} \geq p_{c+i}^{MAX} \end{cases}$
	Asignación de longitudes de onda basados en prioridad	Agrupación de longitudes de onda (Chaing *et al.* 2007, pp. 93-96)
	Diferenciación de QoS proporcional	

Tabla 3.6. Mecanismos de mejora y provisión de QoS diferenciada y absoluta

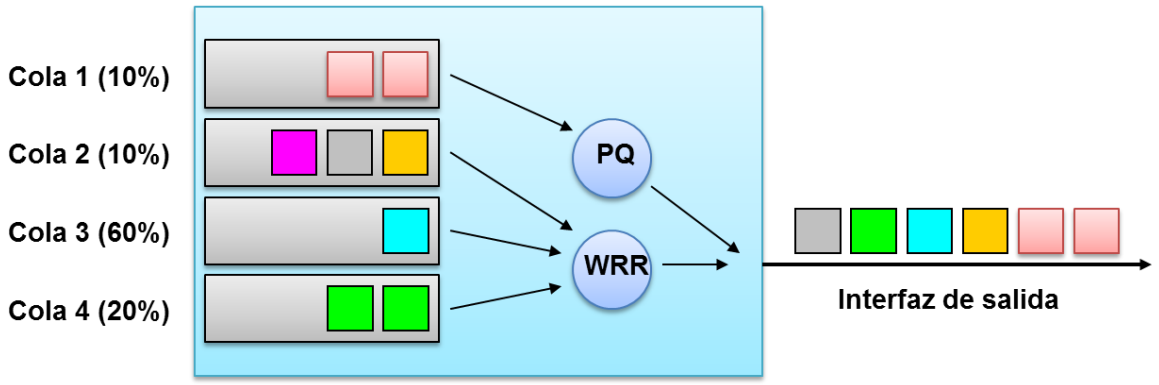
Finalmente, la tabla 3.7 muestra los mecanismos para provisión de QoS borde a borde E2E (*Edge to Edge*) y con la aplicación de ingeniería de tráfico TE.

QoS E2E (clases *gold, silver y bronze*)	**Ingeniería de Tráfico TE (*Traffic Engineering*)**
E2E en forma de bloques de construcción.	Balanceo de carga para tráfico *best effort*
Clases por salto (*per hops*)	Balanceo de carga por efecto de simplificación
Control de admisión basado en enlace	Balanceo de carga basado en reserva
Definición de clase por salto	Optimización de rutas *offline*

Reserva y señalización E2E	
Asignación dinámica de clase	

Tabla 3.7. Mecanismos para QoS E2E e ingeniería de tráfico TE en redes OBS

Finalmente en esta sección se menciona un aspecto que tiene mucha relación con el desempeño de las redes lo constituye su relación con los servicios que soporta. Como se conoce existen tablas de asignación de prioridades y clases a los servicios, esto puede determinar la forma como la información perteneciente a cada servicios puede ser atendida por los nodos cuando lo hace de forma diferenciada. Los elementos de red (enrutadores) emplean sistemas de encolamiento para atención a los servicios, en la figura 3.34. Si los servicios requieren una atención prioritaria es posible que se le asigne una cola individual, la cual será atendida primero, pero se debe tener en cuenta que no se puede usar el 100% de dicha cola.



Algoritmos de encolamiento:

- **PQ:** *Priority Queue*. Siempre va la primera, pero no recibe más de lo asignado.
- **WRR:** *Weighted Round Robin*. Cada cola obtendrá al menos su parte, y si hay caudal libre obtendrá más.

Figura 3.34. Mecanismos de encolamiento para garantizar QoS a diferentes servicios

3.4.1.3. Métricas para QoS

Una vez revisados los conceptos, procesos y mecanismos definidos para desplegar QoS en redes OBS, se procede a definir un conjunto de métricas que permiten obtener resultados sobre la aplicación de estos mecanismos que ayudan a mejorar la

QoS o que ayudan a brindar QoS y a definir las metas extremo a extremo definidas por los operadores de red.

En principio, como se desea evaluar el desempeño de la red OBS se procede a definir un modelo de calidad de servicio, que obedezca los lineamientos del concepto QoS, para lograrlo se sugiere tener en cuenta la percepción o lo que representa la QoS para un usuario final, donde dicho usuario final puede ser un equipo cliente, un equipo servidor, una estación de trabajo, las instalaciones de usuario final, una red privada (LAN ATM, LAN Ethernet) o una red pública, en general cualquier red conectada a OBS a través de una interfaz usuario a red UNI (*User to Network Interface*), igualmente, en el caso de interconexión de diferentes redes, cada red proporciona su contribución para obtener la medida de QoS entre punto finales y entre diferentes operadores de red.

En la figura 3.35 se muestra un punto de partida para un modelo de referencia para QoS extremo a extremo en redes OBS, este modelo muestra la interconexión entre redes OBS mediante una interfaz O-NNI (OBS *Network to Network Interface*).

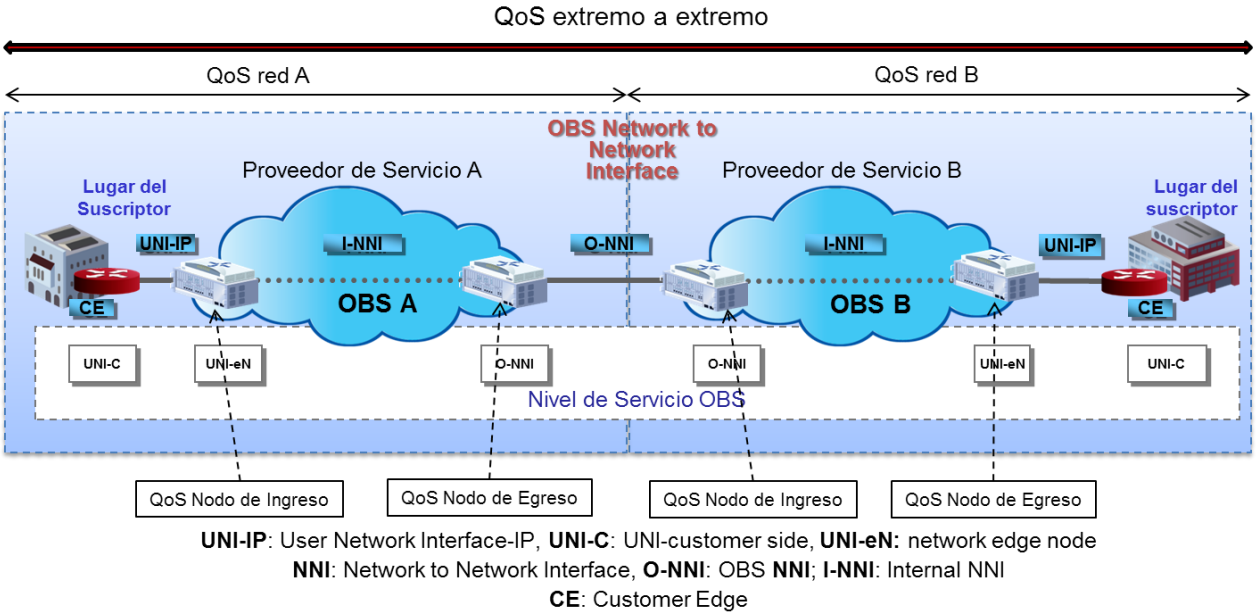


Figura 3.35. Modelo de referencia para medidas de QoS en la red OBS propuesta

Para cada red en particular sea el proveedor de servicio OBS A u OBS B, se pueden definir mecanismos para la aplicación de QoS con orientación a los nodos, es así como en la misma figura se muestra la ubicación de los nodos de borde (actuando como nodos de ingreso y egreso) en un eventual proceso de comunicación entre un suscriptor local y uno remoto que pertenecen a redes IP. Igualmente aunque las interfaces UNI son genéricas, en este caso se enfoca hacia IP por lo que aparece como interfaz UNI-IP. A nivel de servicio se define la UNI del lado del usuario y del lado del nodo de borde y los nodos de interconexión entre redes OBS. Para los nodos centrales se pueden definir interfaces entre dichos nodos notadas como I-NNI. Se recuerda que por definición, las interfaces UNI tienden a ser punto multi punto y las interfaces NNI tienden a ser punto a punto ya sea que operen entre nodos centrales o entre redes OBS.

Respecto a la QoS en OBS mostrada en la figura 3.30 en el proceso de provisión o mejora de la QoS extremo a extremo pueden intervenir una o más redes cada una con multiplex nodos, estos nodos pueden tener un impacto directo en la QoS que puede o no ser percibido por los usuarios, el reto consiste en mantener la QoS ofrecida pese a que existan diferentes números de redes y diferentes configuraciones de las mismas. Lograr este comportamiento en la práctica es difícil y su estandarización a nivel de *interworking* puede resultar complicada.

En seguida sobre este modelo se define la QoS en términos de un conjunto de medidas o métricas que son realizadas con respecto a las ráfagas enviadas desde un nodo de origen hasta un nodo de destino.

Estas medidas pueden ser:

- **Ráfagas transmitidas**, corresponde a la totalidad de ráfagas enviadas a un destino desde el usuario de origen, se puede tener un contador de ráfagas enviadas para conocer cuántas ráfagas son enviadas durante una ventana temporal de observación. Este valor puede ser empleado posteriormente para propósitos de encontrar la relación entre número de ráfaga enviadas/número de ráfagas recibidas y determinar una posible pérdida de información.

- **Ráfagas transferidas exitosamente**, corresponde a las ráfagas que llegan al usuario de destino y no contienen errores. En este caso se debe contar con un mecanismo de control de errores que puede ser desde un *chksum* hasta mecanismos basados en control de redundancia cíclica. Estos métodos solo detectan la ocurrencia de un error pero no lo ubican ni lo corrigen.

- **Ráfagas perdidas**, corresponde a las ráfagas que no alcanzan al usuario de destino, lo cual puede ocurrir por distintas causas, entre ellas: se agota el tiempo *offset* y no se logró configurar la totalidad del trayecto en señalización *one-way*, si los retardos de configuración del trayecto superan los retardos tolerados por los datos (paquetes IP) en este caso si esto sucede resulta mejor descartar la ráfaga (no enviar la ráfaga para que llegue fuera de tiempo) otras causas pueden ser al presentarse contención y los mecanismos definidos para realizar el control de contención en los nodos centrales no opera adecuadamente ocasionando descarte de ráfagas (*dropping*). igualmente por falta o saturación de recursos existentes (rutas ocupadas o falta de longitudes de onda disponibles) o por un inadecuada selección de ruta lo que ocasiona que la ráfaga llegue al destino incorrecto y falte en el destino correcto.

- **Ráfagas con errores**, son las que llegan al destino pero contienen errores en su carga útil. En este caso la ráfaga llega al destino y si el nodo de egreso contiene mecanismos de control de errores (detección y corrección) puede detectar errores en la ráfaga lo que podría conducir a emplear mecanismos de solicitud de retransmisión automática ARQ (*Automatic Repeat reQuest*), ya sea *stop and wait* o con ventana deslizante (*Sliding Window*) mediante procesos de rechazo selectivo SR (*Selective Reject*) o retorno N GB-N (*Go back - n*). Lo anterior puede darse si la red OBS está equipada con estas opciones, de lo contrario no realizará ninguna observación sobre la ráfaga que haya arribado y simplemente la entrega desensamblada al destino y solo los usuarios de destino determinaran si es necesario retransmitir o no la información, estas decisiones se toman en niveles superiores (TCP y Aplicaciones). Aunque los mecanismos de retransmisión de ráfagas puede ocasionar trastornos en el desempeño de la red OBS, es una opción a considerar cuando se la información requerida es de gran importancia en los nodos de destino.

- **Ráfagas faltantes o duplicadas**, son aquellas que llegan a un destino para el cual no se habían enviado. Esto puede pasar por problemas en el control de contención en los nodos intermedios o por errores en el BCP (*Burst Control Packet*) o BHP (*Burst Header Packet*), estos últimos se pueden presentar ya que se puede modificar su contenido.

- **Ráfagas en desorden**, llegan al destino fuera de secuencia, esto puede suceder por efectos del enrutamiento dinámico o por defectos en los mecanismos de control de contención (ver tabla 3.5). Para realizar esta medida se debe dotar a la ráfaga de un campo de número de secuencia SN (*Sequence Number*).

Un factor de importancia que puede afectar el trasporte de las ráfagas desde su nodo fuente hasta el destino lo constituyen los retardos, estos pueden generarse en cualquier punto de la red y se pueden mantener constantes o variar por diferentes circunstancias. Por lo general el tratamiento de los retardos se relaciona con el *throughput* de la red (ver figuras 3.31 y 3.32).

En los nodos de borde, nodos centrales y enlaces WDM las principales fuentes de retardos son:

- En el ensamblador de ráfagas: debido al proceso de ensamble de los paquetes en ráfagas de longitud variable o fija, para lo cual se emplean colas de ensamble. Según el esquema o método de ensamble se generan retardos en los paquetes.
- En la cola de ráfagas, cuando se alistan las ráfagas para ser enviadas, cuando se cumple el *offset*.
- En el módulo de RWA.
- En proceso de generación del BCP.
- Proceso de envío del BCP.
- Procesos de encolamiento del BCP en los nodos centrales.
- En los procesos de conversión O-E-O para las ráfagas (en ingreso E-O y en egreso O-E).
- En los procesos de propagación de la ráfaga y de conmutación.
- En los procesos de conversión O-E-O para el BCP.
- Propagación de en la fibra.
- Retardos de regeneración de señales.

- Retardos de modulación.
- Retardos por los procesos de control de contención.

Los servicios prestados de clase Premium en una red OBS pueden tener valores de retardos fijos para garantizar al cliente la prestación óptima del servicio. En este escenario, los retardos de encolamiento en los nodos de borde son una buena métrica para la prestación de estos servicios, su incidencia en los retardos extremo a extremo puede dar lugar a una buena o deficiente prestación de un servicio de esta clase.

Este aspecto implica que el comportamiento de las redes debe ser diferenciado por clases o FEC (*Forward Equivalence Class*), las clases se pueden asignar a los paquetes IP que llegan a la red OBS ($Clase\ 0$, más baja y $clase\ N$ más alta). Igualmente se puede asignar prioridades a los paquetes ($p0$ baja hasta pn alta).

- **Evaluación del desempeño en redes OBS:**

La evaluación del desempeño de los modelos de red OBS constituye un elemento esencial que permite evidenciar cual es el comportamiento de la red que está siendo sometida a prueba existen dos parámetros que son muy usados para realizar estas medidas se trata la de la perdida de ráfagas y los retardos que experimentan las ráfagas en su tránsito de origen a destino (aunque exsiten otras metrcicas como ancho de banda [kb/s], *jitter* o variación del retardo [ms]).

- **Pérdida de ráfagas,** se puede medir como Probabilidad de Pérdida de Ráfagas BLP (*Burst Loss Probability*): se tiene interés en esta métrica ya que por definición, las redes OBS no necesitan almacenamiento de las DB (*bufferless*) y solo para los BCP se requiere un almacenamiento limitado. Igualmente, cualquier proceso de encolado para el ensamble de las ráfagas se realiza en los nodos de borde en el dominio electrónico, donde se puede gestionar más favorablemente.

  La principal causa de la pérdida de ráfagas se debe a los problemas de contención, la cual ocurre cuando el número de solicitudes de asignación de longitudes de onda es mayor que el número de longitudes de onda disponibles en un tiempo determinado. Si se cuenta con FDL se puede tratar el exceso de

ráfagas, sino estas ráfagas son descartadas. Si se trabaja con diferentes clases es importante considerar la precedencia de descarte (Alta, Media o Baja) y las prioridades asignadas a las ráfagas una mayor a menor prioridad.

En el cálculo de BLP pueden incidir muchos parámetros, por ejemplo, el tamaño de la ráfaga, los mecanismos de ensamble de ráfaga, la variación del tráfico en la entrada de la red, los mecanismos de control de contención, la asignación de ruta.

Por lo general la medida BLP se realiza en presencia de la carga ofrecida por lo general normalizada a 1 Erlang. Y respecto al elemento que se esté evaluando en el momento, por ejemplo se puede calcular la BLP en presencia de mecanismos de enrutamiento con y sin mecanismos heurísticos. Se puede evaluar la BLP en tiempo de simulación para diferentes ventanas de observación. Las metas de QoS extremo a extremo permiten la tolerancia en las ráfagas que se pueden perder para los diferentes servicios soportados, en el caso de las redes OBS la BLP deben estar del orden de $10E-3$.

- **Retardos (Delay),** se puede medir nodo a nodo (*hop by hop*) o extremo a extremo (*end to end delay*), esta medida se contrasta con valores tolerados para los diferentes servicios, igualmente su medida se puede tomar respecto al tiempo de observación (tiempo de simulación) o ante carga de trafico ofrecido. Para estas medidas es necesario contar con valores típicos de retardos de propagación, retardos de procesamiento en los nodos de borde y frontera, retardos de conmutación. Cuando se realizan los diseños de los modelos de comportamiento y de simulación (según la metodología de simulación empleada) se deben hacer las consideraciones sobre los retardos.

En resumen, la medida de BLP y *Delay* (μs) se hace en tiempo de operación (o simulación) y en presencia de carga ofrecida, en el segundo caso se debe tener en cuenta el comportamiento del tráfico en una red como se muestra en la figura 3.36, se destaca el proceso entre llegadas en las redes OBS puede ser el tiempo entre llegada de los paquetes a los nodos de borde, la llegada de los BCP a los nodos centrales, la llegada de las ráfagas a los nodos centrales y en WROBS la llegada de las peticiones al nodo de control central, estas son de tipo aleatorias y el parámetro

principal es el tiempo entre arribos o *Inter-Arrival Time* (*IATime*). Los procesos de atención o de servicio es la forma como se atiende (toma de decisión para reenvío del BCP), el parámetro principal es el tiempo de servicio o *Holding Time*.

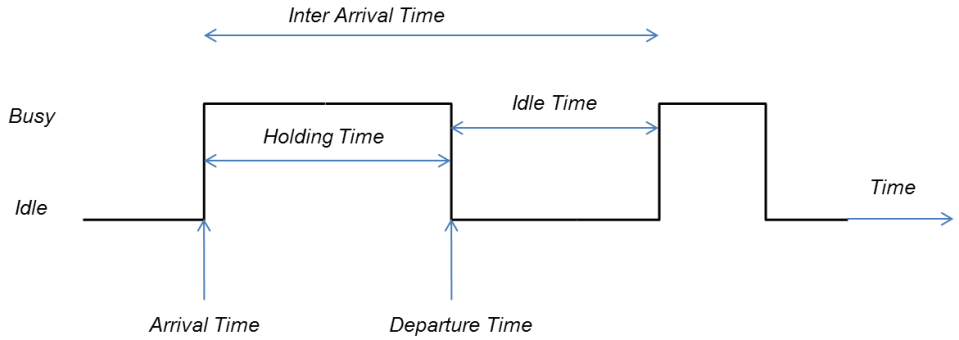


Figura 3.36. Proceso de tráfico en una red de comunicaciones

En resumen, esta sección ha sido dedicada al concepto de QoS, sus mecanismos de mejora y de asignación, así como su perspectiva de aplicación a redes OBS y la definición de algunas métricas que bajo el concepto QoS pueden ser analizadas para conocer el desempeño de una red de comunicaciones. Igualmente, se considera que este concepto es de gran importancia cuando se trata de lograr diseños de redes que cumplan con ciertos parámetros de calidad y que a su vez dichas redes puedan ser susceptibles de mejora bajo condiciones cognitivas.

Finalmente, la figura 3.37 muestra un árbol resumen de la división o categorización de los mecanismos para provisión de QoS en redes OBS. Aunque también puede tomarse como insumo para procesos de mejora de QoS.

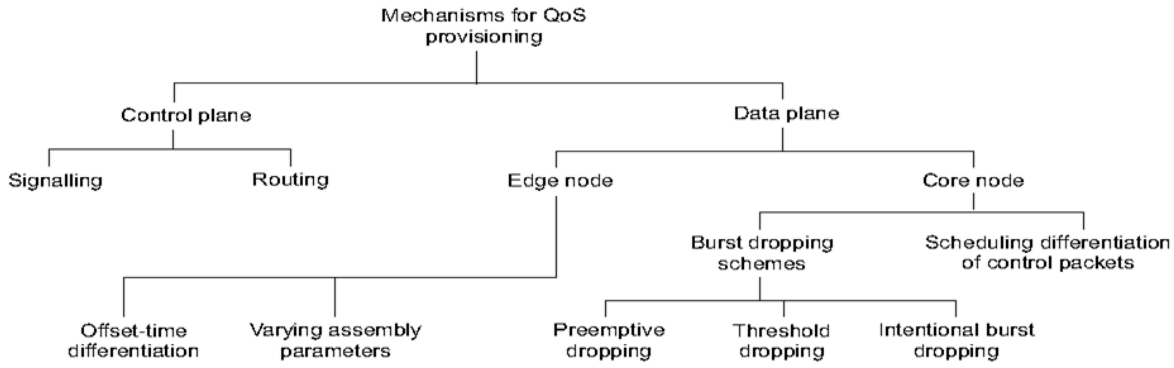


Figura 3.37. Clasificación de mecanismos para provisión de QoS en redes OBS

3.4.2. Propuesta de una Arquitectura Cognitiva

3.4.2.1. Ambientación

En esta sección se retoman los conceptos vistos sobre Cognición, arquitecturas y redes cognitivas con el ánimo de proponer un modelo de **arquitectura de red cognitiva** que pueda ser aplicado en redes por conmutación óptica, en particular se busca que este modelo se pueda emplear en redes OBS. Como es una propuesta reciente, además de su empleo en el desarrollo de los métodos cognitivos para este trabajo de investigación, requiere de la aplicación de más pruebas para su validación las cuales están por fuera del alcance de esta Tesis. Sin embargo, esta propuesta cognitiva se deja como un aporte al campo de las Arquitecturas Cognitivas en redes de comunicación óptica.

Igualmente, debido a la variedad de temas que el desarrollo de una propuesta como la presente puede involucrar (estadística, sicología cognitiva, modelos de memoria, neurobiología, teoría de información, teoría de la complejidad, ciclos de conocimiento, teoría unificada de la cognicion, planos y modelos de conocimiento, investigación de operaciones, meta heurísticas, agentes inteligentes) se considera de gran importancia la revisión en detalle de distintas alternativas de arquitecturas de CN propuestas en la literatura cuya gran mayoría se incluyen en la sección 3.2.5 del presente capítulo, esto ayuda a formar una idea más cercana de lo que puede llegar a ser una arquitectura cognitiva.

La propuesta de una arquitectura con cognición tiene diferentes aristas, debido a que la presencia de métodos o elementos cognitivos en una red OBS puede permitirle aprender sobre su propio comportamiento mientras transcurre el tiempo, logrando que la red desarrolle cierto grado de análisis de problemas, ajuste su operación y como observación general puede incrementar su confiabilidad y robustez. Como ya se ha dicho, para lograr estos objetivos, se deben incorporar conceptos y métodos de aprendizaje de máquina (Langley & Simon 1995; Mitchell 1997), ML ayuda a entender los mecanismos por los cuales, la experiencia puede incidir en el desempeño de las redes OBS.

Por sus características, esta arquitectura se puede tomar como referencia para involucrar en la red OBS los métodos cognitivos propuestos.

Esta propuesta tiene su principal justificación debido a los pocos trabajos de investigación enfocados hacia redes alambradas, al revisar la literatura casi la totalidad de trabajos se enfocan a las redes inalámbricas. Esta aparente dificultad permite la opción de proponer un modelo cognitivo con características mas abiertas.

- **Modelo Inicial**

Casi toda propuesta cognitiva parte del hecho de la interacción del sistema con su entorno o ambiente externo y con sus propios componentes (ambiente interno), la figura 3.38 muestra un esquema típico relacional en el cual las experiencias del entorno son transformadas en conocimiento mediante procesos de aprendizaje y hacer que dicho conocimiento sea empleado por el nodo de aprendizaje que puede actuar sobre el ambiente. En principio cuando el sistema de red se encuentra operando normalmente, se puede deshabilitar el proceso de aprendizaje, aunque esto no es deseable ni sucede así en un entorno de aprendizaje constante.

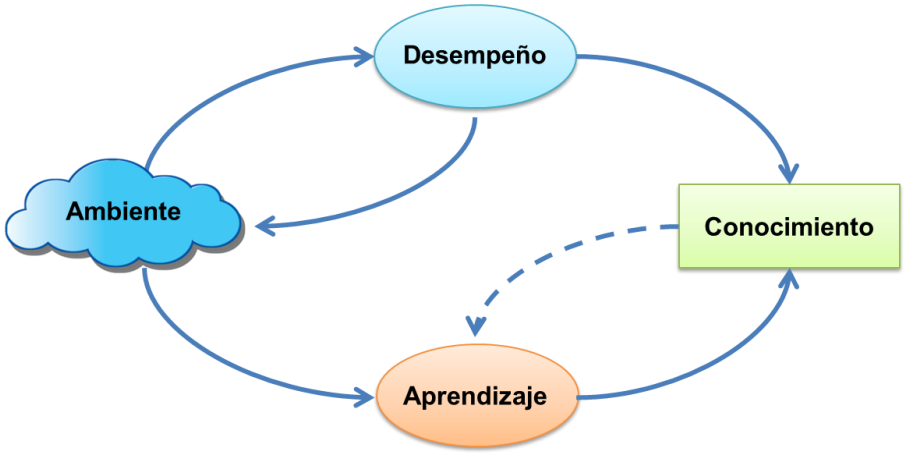


Figura 3.38. Relación entre aprendizaje, conocimiento, desempeño y el entorno o ambiente

Por su parte, el módulo de **desempeño** puede realizar actividades simples como asignar un encabezamiento BCP a una ráfaga o seleccionar una acción de envío de

información por una ruta óptica, aunque también puede involucrar razonamientos complejos, procesos de planeación e interpretación de información.

El objetivo central del módulo o estado de **aprendizaje** es mejorar el desempeño o cualquier tarea, para lo cual el sistema combinado que se muestra puede llevarlo a cabo. Igualmente, el gráfico muestra que el aprendizaje se lleva a cabo *on line* (y cíclicamente) aunque el modelo *off line* es el más empleado, en este caso se supone que las experiencias están fuera del sistema y que el aprendizaje las transforma en **conocimiento** solo una vez. Finalmente la misma figura 3.38 muestra como el conocimiento adquirido puede influenciar el aprendizaje.

Además de ciclo relacional, se cuenta con el ya mencionado ciclo cognitivo cuya funcionalidad es definitiva para demostrar la operación de un método propuesto para ayudar en el desempeño de una tarea dentro de red de comunicaciones.

Con los dos ciclos mencionados más el análisis de nuevas ideas sobre sistemas cognitivos sumando esto con otros rasgos del cerebro humano, como la relación entre la memoria de corto plazo[36] o WM (*Working Memory*) su capacidad para manejar procesos parcialmente independientes, mantener la conciencia del entorno y su posible asocio con procesos sensoriales controlados por uno o múltiples procesadores, y la memoria de largo plazo LTM (*Long Term Memory*). Esta relación implica que la información que percibe la memoria a corto plazo se almacena en la memoria a largo plazo. Es decir en cada aspecto que se aprende como consecuencia de la información que se procesa en la memoria a corto plazo guarda en la memoria a largo plazo en forma de esquemas que pueden variar su automaticidad.

La figura 3.39 elaborada a partir del trabajo de Atkinson & Shiffrin (1968), muestra la relación entre los tipos de memorias (memoria sensorial, memoria a corto plazo y memoria a largo plazo), el proceso seguido por los estímulos recibidos del entorno y como éstos llegan a convertirse en elementos que pueden ser almacenados en la memoria a largo plazo y que pueden ser interpretados como conocimiento. Al observar esta figura se puede inferir que además de ser una representación de la

[36] Con su capacidad de mantener hasta siete (7) ítems al tiempo, el mágico número siete (Miller 1956). (Nota del autor)

forma como los humanos memorizan información, su funcionalidad puede aprovecharse para construir un modelo de interacción con el entorno aplicable a redes de comunicaciones.

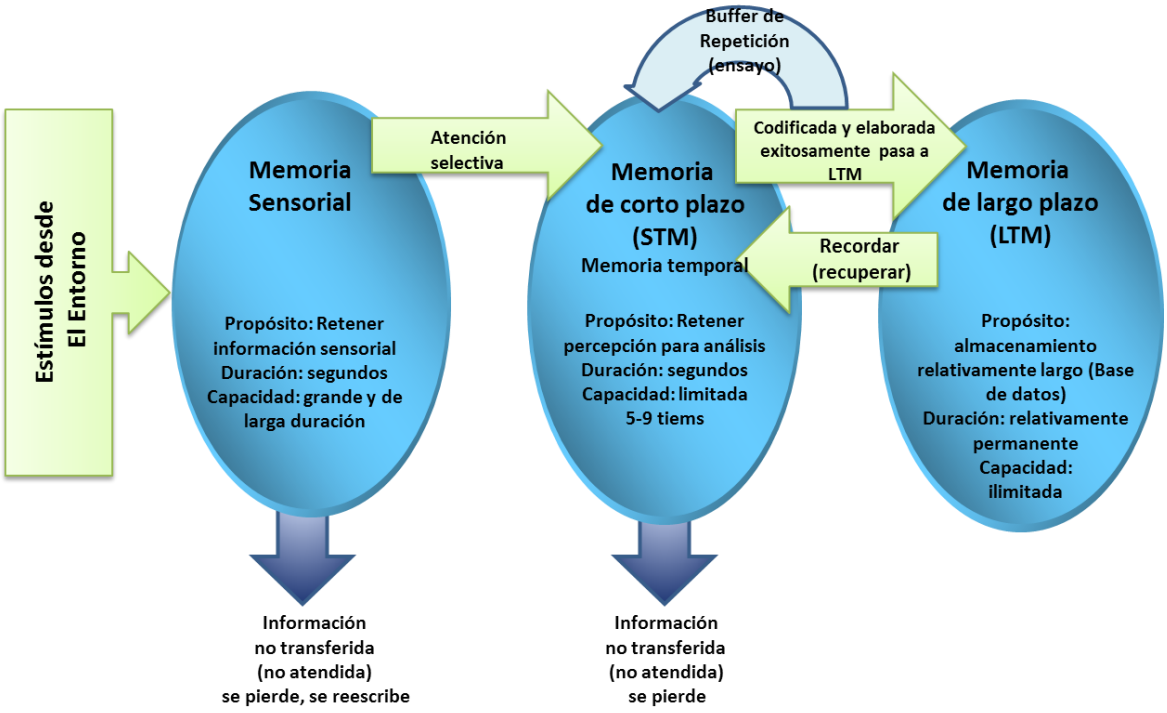


Figura 3.39. Representación general del proceso de memorización en humanos

De esta manera un modelo cognitivo orientado a memorizar acciones realizadas y dependiendo de la importancia que éstas acciones puedan tener, es una aspecto básico a tener en cuenta para la arquitectura propuesta.

A partir de la arquitectura Soar[37] (Laird *et al.* 1987; Lehman *et al.* 2006) se puede proponer una arquitectura basada en los tipos de memoria revisados en la figura 3.39. Esta adaptación se muestra en la figura 3.40, se observa como con base en la sicología cognitiva y los modelos propuestos se identifican elementos que por su funcionalidad pueden formar parte de una aplicación del concepto de cognicion a diferentes entornos, las primeras aplicaciones se enfocan en la robótica. En el caso de las redes de comunicaciones se aplicaron a las redes inalámbricas (Mitola 2007) y con adaptaciones y complementaciones se aplican a las redes alambradas en cualquier entorno LAN, MAN y WAN.

[37] Arquitectura considerada la raíz de la inteligencia artificial clásica. (Nota del autor)

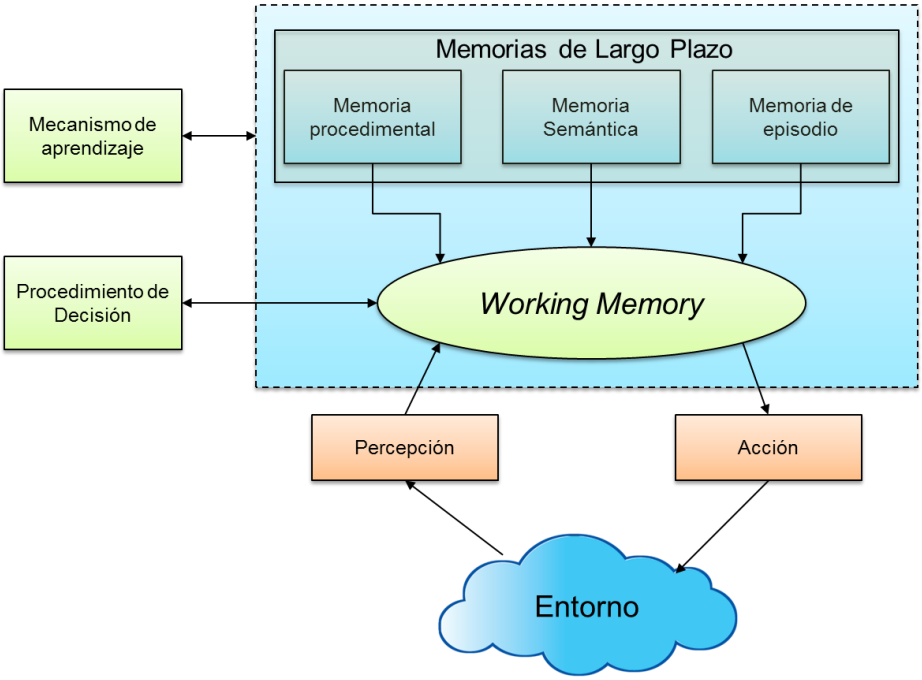


Figura 3.40. Arquitectura cognitiva basada en memorias (recreado a partir del modelo Soar)

Desde las arquitecturas estudiadas en la sección 3.2 del presente capitulo se pueden extraer los elementos que son comunes a las diferentes arquitecturas y la forma como operan y las acciones que llevan a cabo. Con estos elementos se construye la propuesta de la arquitectura cognitiva, cabe destacar que el solo hecho de estudiar estas arquitecturas se constituye en un reto ya que las arquitecturas se enfocan en diferentes conceptos cognitivos, o en las metas extremo a extremo, o en los elementos que controlan la funcionalidad del modelo y además emplean notaciones sintácticas y terminologías disimiles.

- **Componentes esenciales de una Arquitectura Cognitiva**

Los componentes (módulos) de una arquitectura cognitiva trabajan en conjunto para producir un comportamiento. Estos módulos contienen representaciones de conocimiento, memorias para almacenar los contenidos y procesos para adquirir y usar conocimiento.

La operación del modelo de arquitectura cognitiva se basa en la ejecución de mecanismos que realizan diferentes acciones sobre los nodos de la red de comunicación y sobre la totalidad de la red, para realizar estas acciones se requiere contar con un conjunto de elementos dotados con inteligencia. Una descripción funcional de los mecanismos se muestra en la tabla 3.8.

Mecanismo	**Funcionalidad**	**Componentes**
Percepción	**Observación**: - Autonomía. - Captura la información del entorno. - Brinda información sobre el estado o condición real y actual la red (tráfico, desempeño de red). - Separación en grupos de la información adquirida - Se considera el módulo de entrada al sistema. - Toma información de dispositivos, nodos y capas.	- Sensores (a nivel PHY) o monitores de red que conforman un módulo de observación compuesto por un sistema de monitoreo de red. - *Buffer* de eventos en secuencia FIFO. - Pares (parámetro, valor) - Filtraje previo para descartar información no relevante (Módulo de pre procesamiento - *parser*).
Memorización	**Memoria de trabajo:** - Representación simbólica de las entradas o estados percibidos en la observación. - Representación del mundo percibido - Producción de reglas para una situación real (condición - acción) - Contiene las metas (local *goals*) **Memoria de larga duración:** - Almacenamiento de conocimiento adquirido relevante (conocimiento declarativo (semánticas) y procedimental) - Conocimiento resultante de la aplicación exitosa de un método cognitivo (meta heurísticas) - Conformar la historia de casos exitosos	- Base de Información Cognitiva Local LCIB(*Local Cognitive Information Base*) - Base de datos de Conocimiento KDB (*Knowledge DataBase*)
Solución de problemas	**Planeación y Decisión**: - Moverse de un estado obtenido reciente a un estado que representa una meta (*goal state*) - Define mecanismos de planeación	- Sistema Cognitivo de Decisión CDS (*Cognitive Decision System*)

	- Selección de las acciones apropiadas para optimización o alcanzar la meta (local) - Genera planes y toma decisiones a partir de las experiencias, metas o requisitos de QoS y políticas provistas por los operadores de la red. - Genera planes a partir de las metas locales y globales. - Selecciona planes pre definidos o aprendidos. - Planeación mediante razonamiento basado en reglas - Traer información de la KDB y realizar procesos tipo *matching* con la información de la LCIB y de las metas definidas, entonces crea un plan de acciones a seguir.	
Aprendizaje	**Aprendizaje**: - Cuando encuentra un impase o cuando ocurre un impase - Aprendizaje por refuerzo para actualizar recompensa. - Aprendizaje supervisado. - Q-*learnig* - Aprende de la planeación, decisiones y acciones tomadas - Aprendizaje no supervisado - Aprendizaje desde la Observación, Planeación, toma de decisiones y actuación o acción.	- Módulo de Aprendizaje LMD (*Learning Module*)
Cooperación e interacción	**Comunicación con otros nodos o sistemas cognitivos:** - Compartir información cognitiva con otros módulos cognitivos y sistemas de decisión cognitiva. **Interacción entre diferentes niveles:** - A nivel de red y en modelos superpuestos, aumentados o pares a través del diseño orientado a *Cross Layer.*	- Módulo de cooperación e interacción con otras arquitecturas I&CM (*Interactive and Cooperative Module*) - Plano de coordinación Cross Layer CLP (*Cross Layer Plane*)
Acción	- Adaptación - Inicia procesos seleccionados	- Módulo de Actuación o acción AM (*Acting Module*), construido

	- Acción sobre el plano de control OBS	con elementos actuadores.
Razonamiento e inferencia	- Producción o elaboración de reglas, cuando una regla de producción coincide con un estado actual la regla es ejecutada como una acción. - Selección de los planes apropiados para satisfacer una meta. - Puede usarse razonamiento probabilístico - Uso de mecanismos basados en reglas y basados en similitud (Sun & Zhang 2006).	- Módulo de razonamiento e Inferencia R&IM
Control y gestión	- Procesos de gestión: Algunos tomados de GMPLS. Definición de políticas, perfiles de usuario y requisitos de QoS.	- Sistema de Gestion y Control C&MS (*Control and Management System*)

Tabla 3.8. Descripción funcional de una arquitectura cognitiva

De la tabla anterior, no siempre se toman todos los elementos mencionados sin embargo debido a la falta de estandarización al respecto, se plantean modelos que incluyen además de estos, otros aspectos funcionales. Para la propuesta siguiente, la tabla 3.8 es un insumo importante.

Un primer modelo recreado dentro del ciclo cognitivo se muestra en seguida en la figura 3.41 en el caso de una red OBS, como se observa, para relacionarse con el entorno los componentes del ciclo necesitan sensores y una vez que se toman acciones, se deben tener actuadores que las realicen. Aunque su descripción es general, su aplicación a una red OBS particular puede hacerse ya sea con orientación a los nodos OBS (de borde y centrales), a las diferentes capas de la arquitectura de protocolos o con orientación a la totalidad de la red, en cada instancia, se pueden acondicionar los estados y eventos a la acción a realizar por parte del método o el sistema de decisión cognitiva.

La importancia del ciclo cognitivo es que así como puede controlar la funcionalidad total de la arquitectura, también se puede desplegar nodo a nodo y nivel por nivel, su escalabilidad lo permite. Igualmente, a través de diseño CL los estados del Ciclo cognitivo pueden interactuar, por ejemplo al detectar una falla a nivel PHY a través del CL se pueden tomar acciones en los niveles de red o superiores antes de disparar procesos de comunicación en esos niveles. La figura 3.42 muestra la aplicación en doble ciclo o en estratos con compartición de eventos y estados.

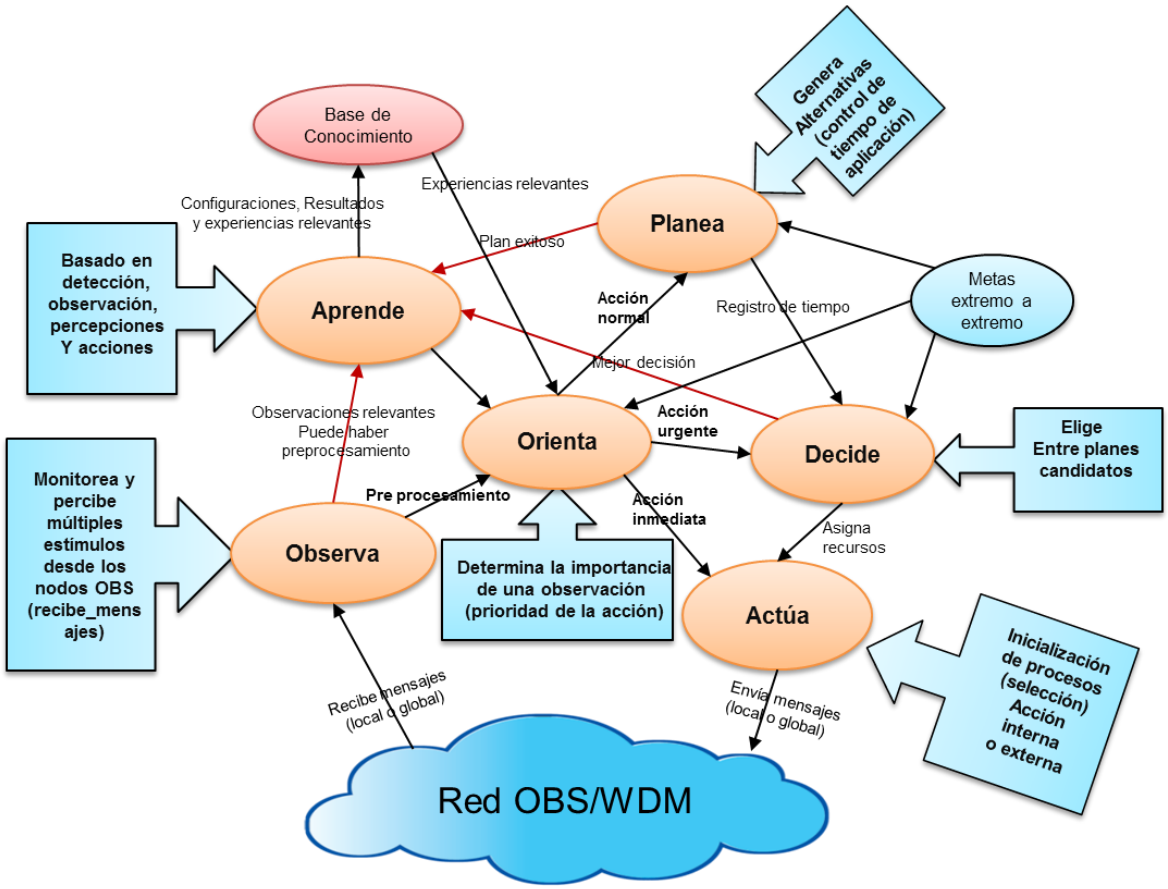


Figura 3.41. Aplicación general del ciclo cognitivo a una red OBS

Siguiendo el concepto de red cognitiva estudiado en la primera sección del presente capítulo, esta CN debe ejecutar el ciclo cognitivo mientras consigue mantener las metas extremo a extremo (*end to end goals*). Es importante anotar que la mayoría de propuestas sobre redes cognitivas no hacen mucho énfasis en el conocimiento que posee la red. Es importante que en conjunto con el estado de aprendizaje se incluya una base de conocimiento KB (*Knowledge Base*) y una base de datos local que pueda actuar como memoria de corto plazo, es decir lo que se considere como aprendizaje significativo se almacena en la KB luego, esta información será empleada en procesos de planeación, toma de decisiones y definición de acciones.

En cuanto a los procesos cognitivos, estos pueden operar centralizados o distribuidos, lo anterior obliga a tomar una decisión al respecto. En un sistema centralizado se tendría que almacenar la totalidad del conocimiento de la red, a esto se suma toda la información de la red que un posible ciclo de cognición podría

necesitar para su operación. Sin embargo cuando el enfoque es hacia sistemas cognitivos distribuidos, puede ocurrir que haya desgaste realizando acciones repetidas en los nodos y además se cuente con un conocimiento limitado, por ejemplo sobre avance en el logro de las metas extremo a extremo. Por lo visto, la toma de la decisión al respecto puede depender del entorno de aplicación, esto último ha ocasionado una verdadera explosión de soluciones.

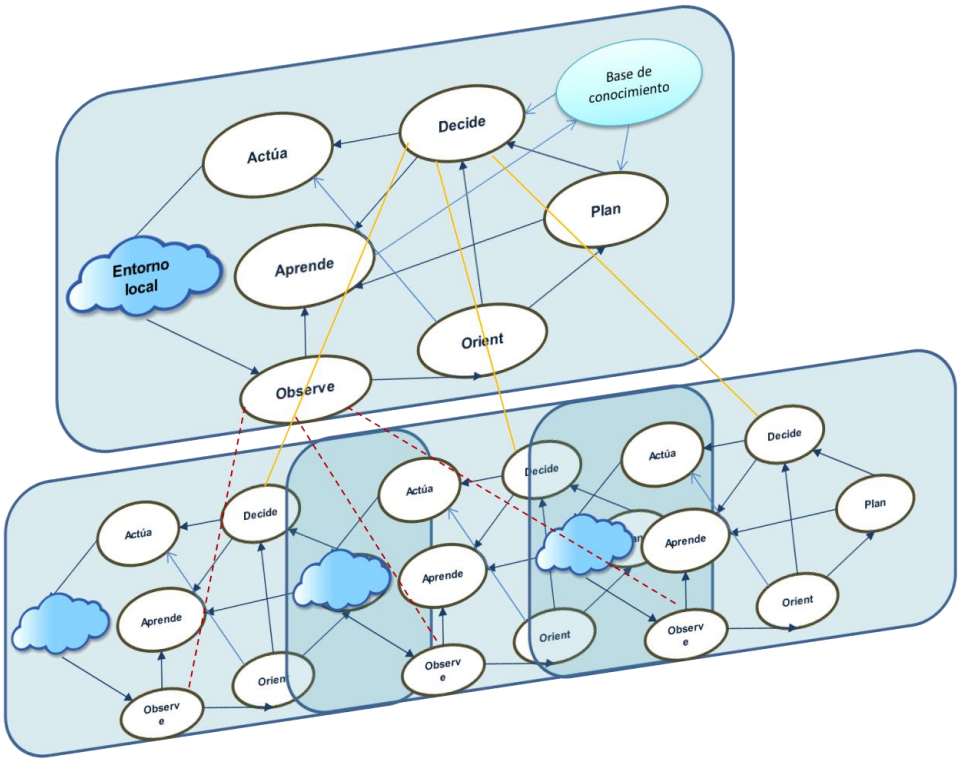


Figura 3.42. Relación doble ciclo cognitivo

Debido a lo anterior, es importante tener en cuenta que al diseñar una estructura cognitiva debe ser modular, que se pueda actualizar según sea necesario y que teniendo en cuenta el crecimiento de las redes, esta estructura debe ser escalable, una opción en lo posible “a prueba de futuro”.

Al optar por una estructura distribuida se debe contar con una serie de agentes[38] inteligentes distribuidos o también llamado sistema multi-agentes MAS (*Multi-Agent System*) que pueden operar en conjunto con otros o de manera individual. Estos

[38] Un agente se define como un elemento que percibe su entorno a través de sensores y puede actuar sobre dicho ambiente usando efectores”

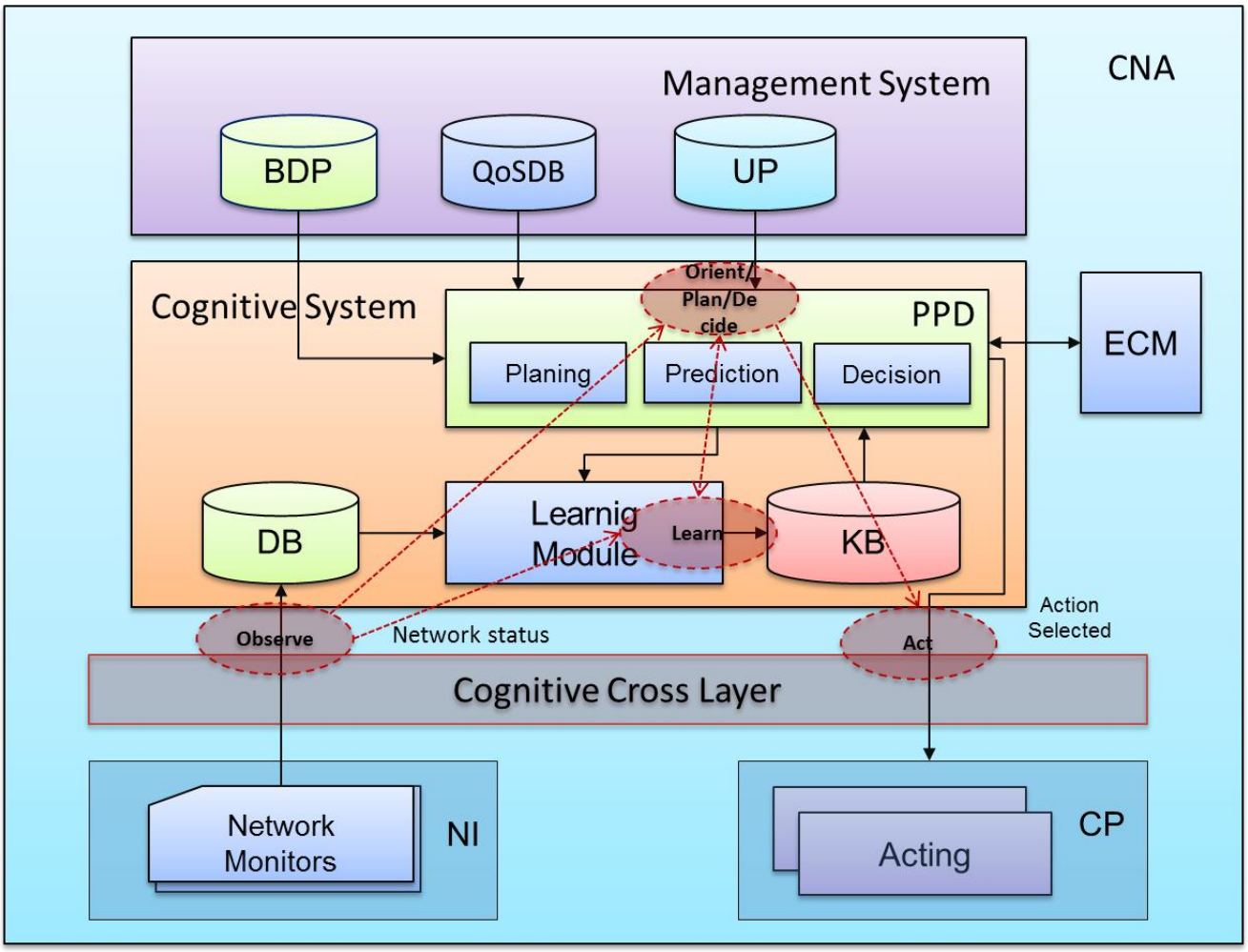
agentes mientras se encuentran en el entorno de las redes OBS deben tener la habilidad de aprender y tomar decisiones de tal forma que ayude al cumplimiento de las metas extremo a extremo.

La ubicación de estos agentes puede hacerse mediante piezas de software que pueden ubicarse en los nodos de la red OBS (nodos o enrutadores de borde y de centro). Considerando además que cada nodo de la red OBS está compuesto por una arquitectura lógica en niveles o capas, la construcción de un Nodo Cognitivo será el resultado de combinar la arquitectura funcional por capas de OBS y los mecanismos o métodos cognitivos.

La figura 3.43 muestra el modelo general de arquitectura cognitiva propuesta, con el objetivo de distinguirla de otras propuestas se decide llamarla ARCO (Arquitectura de Red COgnitiva) en su versión de prueba, igual su nombre implica que puede servir de mecanismo que puede optimizar el envío de información, sus elementos constitutivos (enfoque modular) y las interacciones entre módulos y con el entorno. Como se ha anotado con anterioridad, se trata de un modelo general que podría aplicarse a cualquier red óptica, solo que el enfoque en esta ocasión es hacia redes OBS. Se recuerda que el área de cognicion aún permanece como un ítem abierto y se siguen recibiendo propuestas, en este caso se ha querido involucrar elementos que se considera no estaban en otras propuestas.

Entre los aspectos relevantes que considera esta nueva propuesta se consideran las siguientes:

- Es un modelo general no estratificado por niveles lo que hace que pueda emplearse en entornos de arquitecturas por niveles y *cross layer*.
- Incluye un módulo de predicción para definir eventos posteriores o inferir comportamientos posteriores.
- Define bases de datos para memorización sensorial, temporal y de largo plazo.
- Propone bases de datos como soporte al sistema de gestión (es posible incluir un comportamiento Gestor/Agente).
- Incluye metas extremo a extremo.



CNA: *Cognitive Network Architecture*
PDB: *Policies Data Base*
QoSDB: *QoS Data Base (Goals end to end)*
UP: *User Profiles Data Base*
PPD: *Planing, Prediction, Decision Module*
KB: *Knowledge Base*
ECM: *External Colaborative Communication Module*
CP: *Control Plane*
DB: *Data Base (local)*
NI: *Network Instances*

Figura 3.43. Modelo general de la propuesta de arquitectura cognitiva ARCO (Arquitectura de Red Cognitiva)

- Modela el ciclo cognitivo tradicional.
- Tiene en cuenta el conocimiento propio de la red.
- Los actuadores y monitores pueden estar ubicados en instancias de red, en nodos o en los niveles de los nodos para lo cual se incluye el *Cross Layer*.
- Presenta un módulo para comunicación colaborativa con otros entornos cognitivos.

Esta arquitectura puede operar a partir de tomar información del estado de la red a través de monitores de red (por lo general se les llama sensores), esta información constituye una observación sensorial que puede filtrarse o interpretarse y se lleva a la base de datos DB, esta información se lleva al módulo de aprendizaje (*Learning Module*), donde dependiendo del modelo de aprendizaje que contenga el modulo (ya sea por clasificación y regresión – aprendizaje supervisado, semi-supervisado y no supervisado; refuerzo; aprendizaje para interpretar y aprender situaciones o eventos), otros insumos obtenidos en el módulo de aprendizaje recibidos desde el módulo PPD (mejor plan, plan de choque, resultados de las predicciones, resultados de la toma de decisiones – después de la aplicación de los parámetros provenientes del sistema de gestión), mediante una selección (puede ser por comparación u optimización) se procede a almacenar la información más relevante en la Base de conocimiento (KB).

Posteriormente el módulo PPD con los parámetros del sistema de gestión (*Management System*) y con la información proveniente de la KB, toma una decisión y mediante la selección de acciones (cognitivas) las ejecuta mediante actuadores (*acting*). Por su parte el *cross layer* puede ayudar a intercambiar información entre niveles de la arquitectura de red de comunicaciones, este *Cross Layer* puede tener comunicación directa con las capas de la red (por ejemplo física, MAC y red).

Finalmente y como se trata de un sistema dentro de un modelo de *interworking*, se cuenta con el módulo ECM (Módulo de Comunicación Externa) que permite la cooperación con otros sistemas y arquitecturas cognitivas se pueden intercambiar requerimientos. Se observa entonces como los estados y eventos que forman parte del ciclo cognitivo tienen lugar en el proceso de operación de la CNA (*Cognitive Network Architecture*) propuesta.

3.4.2.2. Modelo Cognitivo OBS

La propuesta de la arquitectura comienza mostrando el modelo general a nivel de red OBS, luego se prosigue con la propuesta del diseño de un nodo que incluye elementos cognitivos para OBS y para OBS y TCP tanto para el nodo de borde como para el nodo central.

- **Diseño para red OBS orientado a nodo**

Una vez se cuenta con el modelo de arquitectura general, se procede a su adaptación a la red OBS en los nodos de borde y nodos centrales. Después de realizar un análisis sobre la funcionalidad de los nodos de borde y nodos centrales en una red OBS se procede a plantear un modelo cognitivo orientado a nodo, lo que se busca es ubicar los elementos cognitivos que desempeñan las funciones cognitivas desarrolladas por los métodos o procesos cognitivos que se introduzcan en la red. De este razonamiento surge la gráfica mostrada en la figura 3.44. Se ubica un módulo adicional denominado Cognición que puede contener el método cognitivo o en general se un agente inteligente, otra perspectiva permite ubicar al ciclo cognitivo en este espacio.

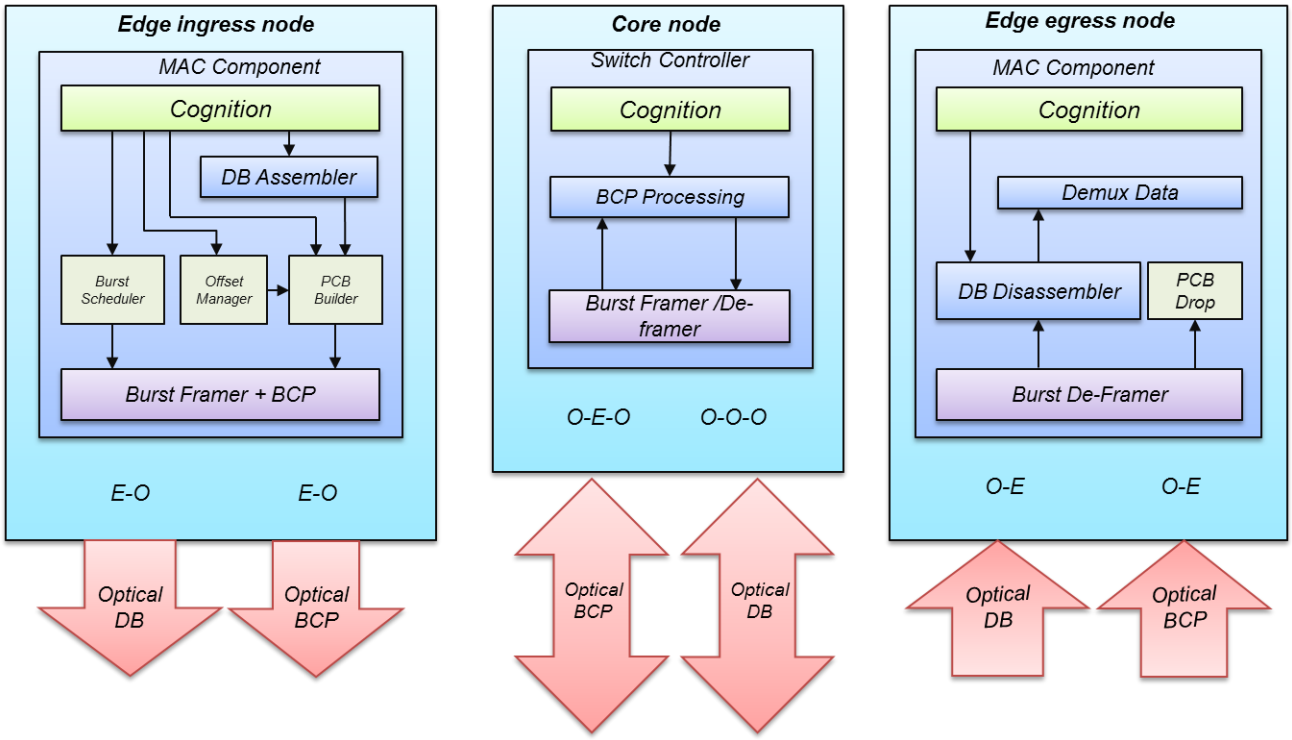


Figura 3.44. Modelo orientado a nodo (borde y central) niveles MAC y PHY

Aunque la figura no muestra una interacción entre los diferentes módulos de Cognición de los nodos OBS, se puede contar con una interfaz de comunicación al motor cognitivo de red, como se evidencia en el módulo ECM de la arquitectura ARCO. Como puede observarse el hecho de incluir un módulo adicional tipo *overlay*

es una alternativa que permite una interacción del concepto de cognicion con las funciones existentes en el nodo (ensamble/desensamble de ráfagas, enrutamiento, asignación de recursos, control de contención, procesamiento del BCP) esto implica que se deben incluir elementos adicionales a manera de sensores y actuadores en cada módulo funcional o por niveles o por planos.
La figura 3.45 muestra una alternativa a través de la aplicación del concepto de agente cognitivo o agente inteligente. En la figura se observa como el agente inteligente puede comportarse como una **instancia** de una arquitectura cognitiva (arquitectura ARCO por ejemplo) y realizar la funcionalidad del ciclo cognitivo.

Según sea la elección se puede tomar esta notación que muchas veces está más cerca de la robótica que de las redes, aunque el aspecto relevante es su funcionalidad, es por eso que su aplicación a redes de comunicaciones ópticas es muy viable.

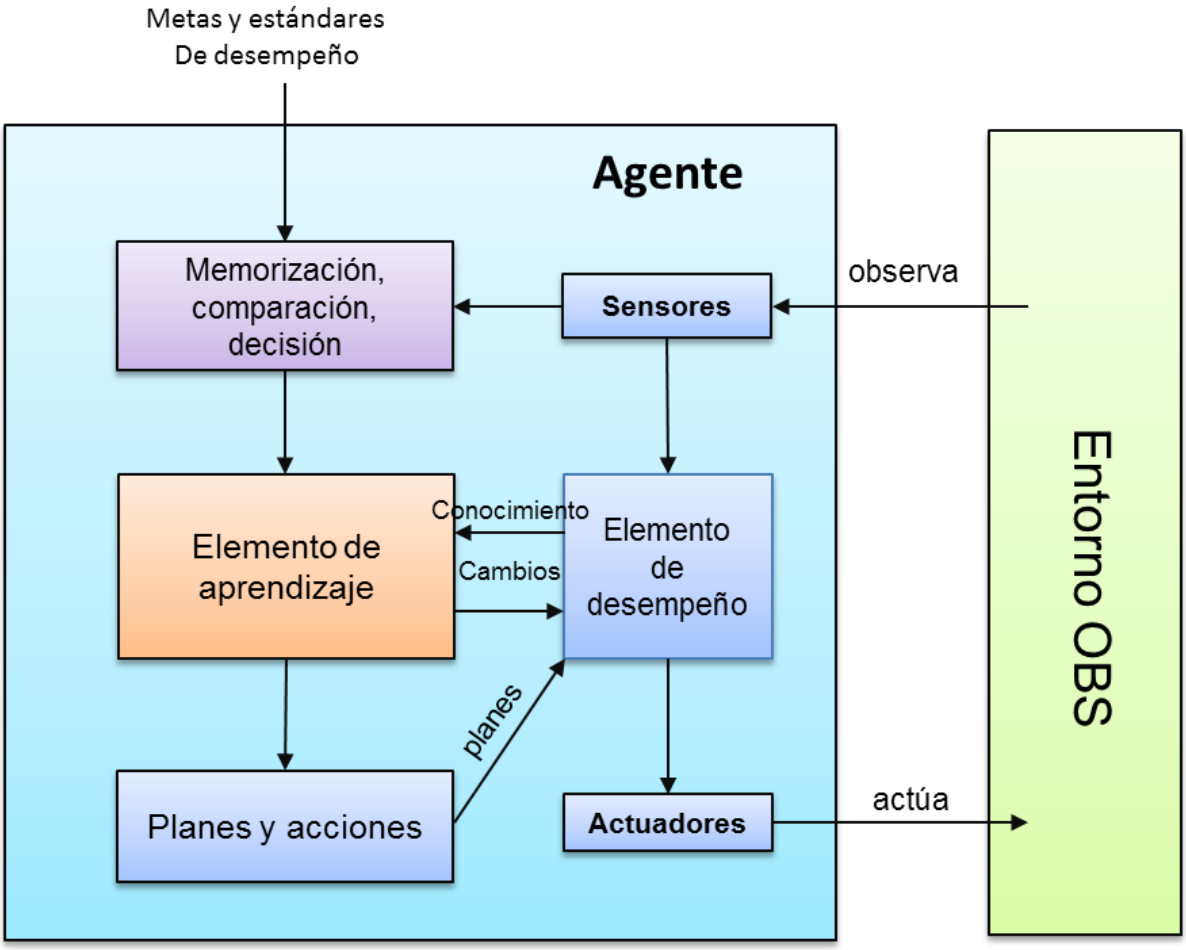


Figura 3.45. Modelo de agente inteligente con abstracción ARCO sobre OBS

Por su parte en la figura 3.46 y 3.47 se muestra una propuesta orientada a nodo (de borde y central) con una instancia del control de cognicion general. Se destaca además la inclusión de elementos cognitivos en módulos funcionales, en los niveles tanto en los nodos de borde como nodos centrales.

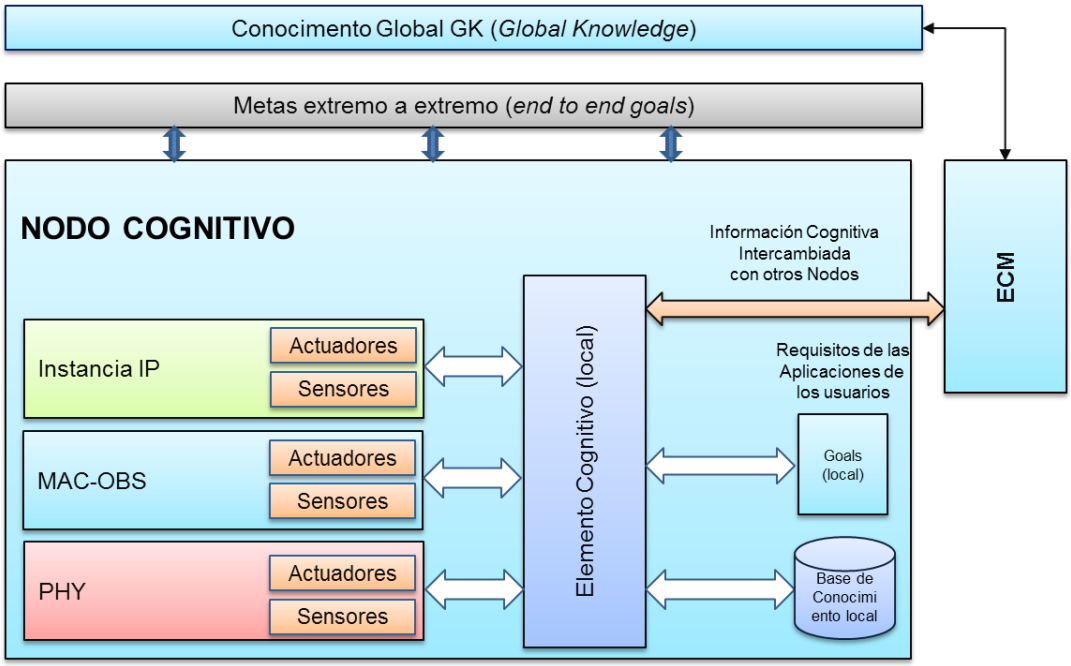


Figura 3.46. Modelo de Nodo Cognitivo nodo de Borde OBS

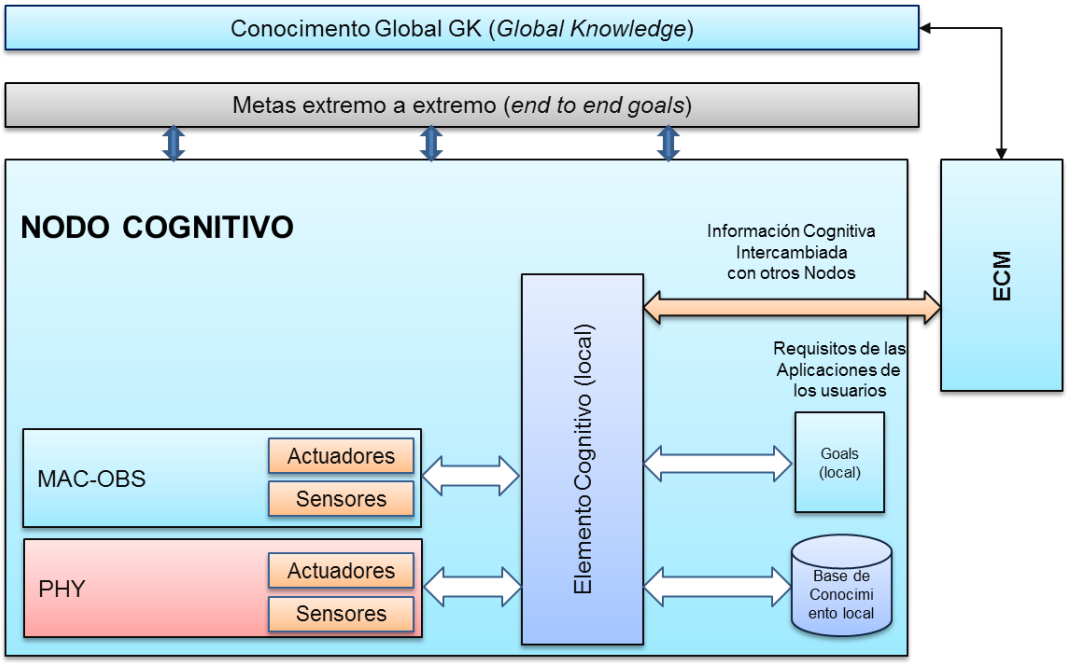


Figura 3.47. Modelo de Nodo Cognitivo nodo Central OBS

En el nodo cognitivo de borde mostrado en la figura 3.46 se ubica una instancia IP (opcional), además en el nivel MAC-OBS, las funciones que se incluyen están en consonancia con la descripción hecha en la figura 3.44 correspondientes a los nodos de borde. En la figura 3.47 se toman en cuenta las funciones propias del nodo central acorde con lo descrito en la figura 3.44.

Otras posibilidades que se pueden considerar incluyen los planos de control y de datos definidos para una red OBS. Más adelante, se agrega la funcionalidad *Cross Layer* como complemento a lograr procesos de interacción con los planos y niveles de la red.

Con estos elementos es posible darse una idea más clara de los aspectos de cognicion aplicados las redes OBS, en cuanto a los mecanismos y lenguajes para intercambio de información, se pueden emplear las instancias definidas para el modelo *Cross Layer* que se describe en la sección 3.4.3.

- **Relación QoS y Cognición**

Finalmente, para terminar esta sección se propone una arquitectura que relaciona explícitamente la calidad de servicio QoS y la cognicion, se trata de una propuesta genérica que puede estar abierta a discusión. La figura 3.48 describe una aproximación que sirve como insumo para futuros proyectos de investigación sobre redes OBS y otras tareas conexas.

Como se observa existen muchas opciones para la definición de arquitecturas cognitivas, es importante conocer el entorno de aplicación y conocer los módulos básicos que hacen parte de estas arquitecturas. En seguida es relacionar los estados del ciclo cognitivo y posteriormente definir las funciones que realizan los procesos cognitivos que interactúen con los elementos de red y relacionen conocimiento con metas, políticas y las demás funciones definidas para un entorno puntual.

En resumen, cuando se busca aplicar el concepto de cognicion a las redes de comunicaciones se sugiere contar con una arquitectura de referencia y dado que existe una gran variedad de propuestas casi en su totalidad para redes entornos inalámbricos, es viable diseñar una arquitectura que se adapte al entorno de red que

se está abordando. La arquitectura ARCO es el resultado de un análisis minucioso de diferentes propuestas tanto de diseño del comportamiento cerebral (sicología cognitiva) como de arquitecturas enfocadas a redes inalámbricas (celulares, PAN y WLAN).

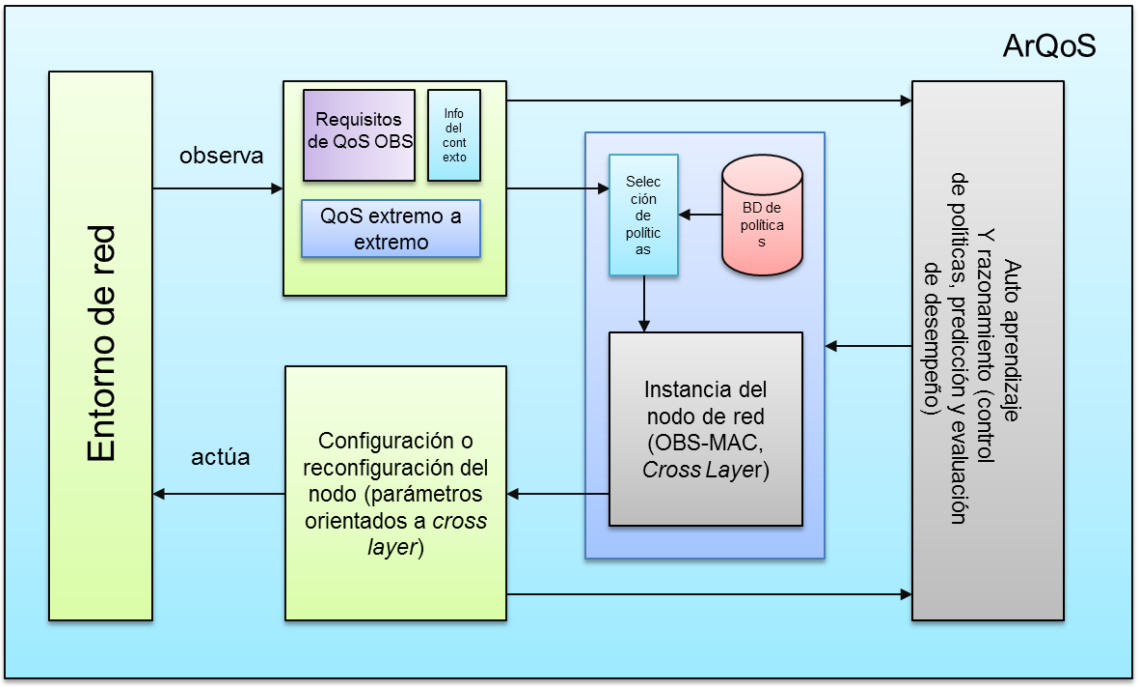


Figura 3.48. ArQoS arquitectura basada en QoS

Antes de introducir la siguiente sección vale anotar que al incluir el diseño orientado a *Cross Layer* puede resultar casi natural en algunos escenarios, sin embargo, un diseño cuidadoso del mismo puede actuar sin inclusión de métodos cognitivos, en la siguiente sección se propone un modelo de interacción CL en una red OBS y entre una OBS y la suite de protocolos TCP/IP. Posteriormente, se procede a incluir elementos cognitivos.

3.4.3. Propuesta de diseño de un CL- *Cross Layer* (Modelo de Integración)

3.4.3.1. Ambientación

Un aspecto de gran importancia al momento de intentar realizar un diseño orientado a CL (*Cross Layer*) es tener en cuenta cual es el funcionamiento de una arquitectura

de protocolos sin CL (en este caso se propone analizar la funcionalidad de los protocolos TCP/IP y OBS, primero por separado y luego integrados mediante un modelo de superposición). Al realizar este análisis funcional se puede conocer cuál es el comportamiento de los protocolos TCP e IP, para luego realizar la inclusión de la red OBS (o WROBS) como subred y analizar de nuevo el desempeño de TCP/IP sobre OBS en la transferencia de información.
Al proponer el análisis de los protocolos y arquitecturas incluidas en esta sección, se comienza con una red OBS con nodos distribuidos y posteriormente se incluyen algunos elementos de la suite TCP/IP como opción seleccionada para definir una propuesta de *Cross Layer* que permita la interacción entre estas dos tecnologías, además se busca lograr la inclusión de métodos cognitivos a partir de la arquitectura de red cognitiva ARCO propuesta en la sección anterior.

Para la descripción inicial de la red OBS, se debe partir del hecho que funcionalmente una red OBS está definida por dos planos, un Plano de Control y un Plano de Datos como se mostró en el Capítulo 1, la división en planos se justifica dado que el paquete de control BCP se envía por un canal de control CC perteneciente al grupo de canales de control CCG, mientras las ráfagas de datos DB son enviadas por canales de datos DC pertenecientes a un grupo DCG (ver figura 1.34, Capítulo 1). Transportar el BCP sobre el Plano de Control implica tener en cuenta lo siguiente:

- Arquitectura de la red OBS.
- Modelo de señalización empleado.
- Funciones de procesamiento y reenvío del BCP.
- Asignación de recursos.
- Control del *offset*.
- Disciplina de colas (FIFO por ejemplo).
- Control de los OSF (conmutadores ópticos).
- Control de los mecanismos de contención.

De otro lado, los aspectos antes mencionados inciden en la operación del Plano de Control en el dominio electrónico, cuando estas funciones se implementan muchos autores sugieren emplear dispositivos FPGAS y procesadores de red NP (*Network Processors*), aunque puede haber otras opciones de dispositivos de muy larga escala

de integración. Existe entonces una alta dependencia del plano de control respecto al dominio electrónico lo cual plantea retos en investigación impulsando a buscar la forma para que el BCP pueda ser procesado completamente en el dominio óptico, lo cual no solo evitaría los problemas de congestión que se puedan presentar en el dominio electrónico, sino que convertiría a OBS en una red completamente óptica (transparente).

El Plano de Control es el encargado de tratar con el BCP, esto sugiere que dicho plano debe tener en cuenta los diferentes campos que lo componen, los cuales se muestran en seguida acordes en la figura 3.49.

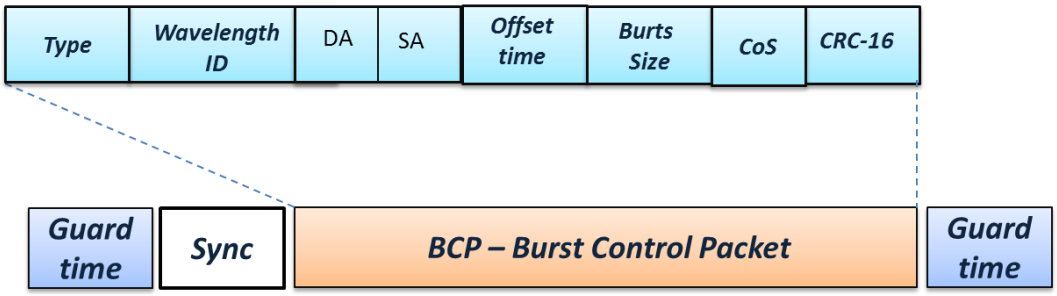


Figura 3.49. Formato de la PDU BCP y la *frame* BCP

El significado de los campos es el siguiente:

- *Type*: es el tipo de señal de control,
- *Wavelength ID*: longitud de onda que transporta la ráfaga,
- *DA*: dirección de destino (nodo de egreso),
- *SA*: dirección de origen (nodo de ingreso),
- *Offset*: tiempo entre el BCP y la ráfaga,
- *BL:* longitud de la ráfaga en el dominio del tiempo,
- *CoS*: clase de servicio asignada a la ráfaga,
- *CRC*: cheque de redundancia cíclica o *chksum*.

Como se puede observar, cada campo debe ser configurado y llenado en los diferentes nodos que componen la red OBS, estos valores se introducen por primera vez en los nodos de borde y se deben actualizar en los nodos centrales en la medida que el BCP recorre el camino asignado.

En cuanto al Plano de Datos, éste se encarga principalmente de la generación y transporte de las ráfagas de datos BD (conformada por paquetes de datos), actúa en el dominio electrónico mientras es ensamblado y se alista para su envío y en el dominio óptico mientras recorre los diferentes nodos que componen la red OBS, el formato general de esta unidad de datos se muestra en la figura 3.50, las bandas de guarda son necesarias para procesos de transporte en tiempo real.

Figura 3.50. Estructura de la *frame* OBS para la DB

El campo de *chksum* se incluye cuando se hace necesario un comportamiento ARQ extremo a extremo para las ráfagas. Tanto los planos de control como de datos se tendrán en cuenta para realizar los diseños propuestos en el Capítulo 4.

Una vez que se han introducido elementos relevantes sobre OBS, se hace necesario incluir algunos conceptos sobre la suite TCP/IP, este conjunto de protocolos se los considera de alta relevancia en las comunicaciones actuales, su arquitectura básica se muestra en la figura 3.51 y los procesos de control de congestión y control de flujo se describen con mayor detalle en el Apéndice J del presente documento.

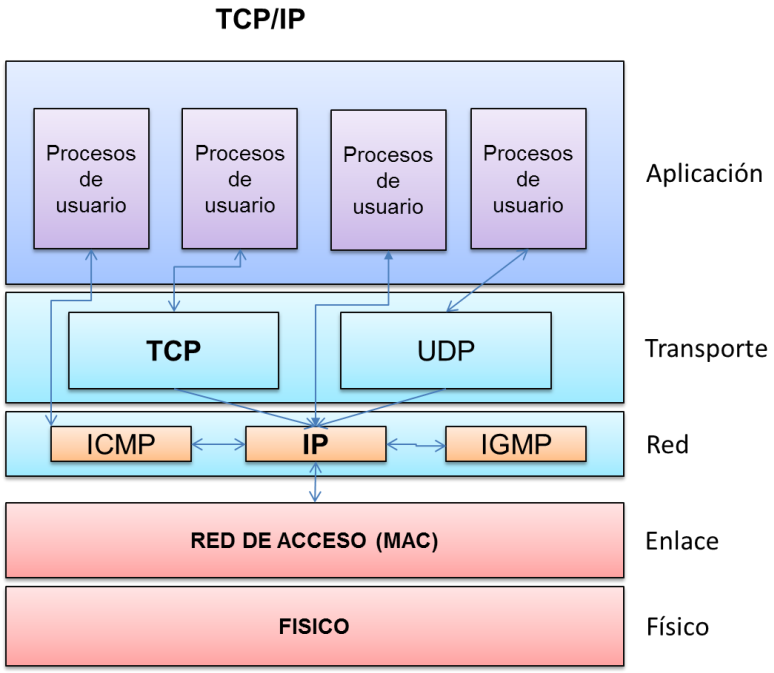


Figura 3.51. Descripción básica de la suite TCP/IP

3.4.3.2. La propuesta

En un principio los objetivos de la Tesis giran alrededor de construir Métodos Cognitivos para ser aplicados en diferentes componentes de una red OBS con la hipótesis de mejorar algunos de sus aspectos funcionales (por ejemplo en procesos de enrutamiento, asignación de recursos, ensamble de ráfagas, control de contención). Como se ha explorado en los entornos inalámbricos, la aplicación de elementos cognitivos se puede considerar como una forma de romper las normas de las redes actuales (jerarquías por niveles), es por eso que su inclusión en las redes está muy ligada al concepto de diseño orientado a *Cross Layer* como parte de la misma.

Luego de algunos análisis al respecto se encuentra la necesidad de definir una posible arquitectura por niveles que permita observar la interacción entre OBS como red subyacente y otra tecnología de transporte que utilice los servicios de conectividad que pueda brindarle OBS. Aunque también es posible explorar la opción de emplear la red OBS en su descripción modular y funcional por capas (y también por planos) y tratar de implementar un CL entre sus niveles.

En esta sección se propone un diseño orientado a CL empleando la funcionalidad OBS para servir como red de transporte o *carrier* del tráfico intercambiado por otros protocolos o arquitecturas de protocolos. Explorando opciones, si OBS se piensa convertir en la tecnología soporte de la Internet del futuro (cercano), puede usarse como infraestructura de interconexión para cualquier otra clase de opciones tecnológicas, entonces es posible encontrar:

1. **SONET/OBS**: Red Óptica Sincrónica (ANSI T1.101 1988) sobre OBS, puede usarse para transporte de flujos STS-n (para n $\in$ {1, 3,12, 24, 48, 192, 768}), dado el modelo en capas de SONET se puede emplear como nivel de enlace para ensamblar dichos flujos TDM en ráfagas OBS y después ser transportados por los enlaces DWDM aprovechando la granularidad y la ventaja de la multiplexación de longitudes de onda ausentes en SONET.

2. **SDH/OBS**: Jerarquía Digital Sincrónica (ITU-T G.707; ITU-T G.708 1992) sobre OBS, se puede emplear como en el caso de SONET, solo que los flujos serán

STM-n (para n є {1, 4, 16, 64, 256}), igualmente los flujos TDM se pueden ensamblar en ráfagas y aprovechar las bondades de OSB, teniendo en cuenta que muchos de los flujos sincrónicos de SDH y SONET pueden provenir de la inclusión de esta tecnologías en entornos de acceso y metropolitano.

3. **ATM/OBS**: El Modo de Transferencia Asincrónico (CCITT[39] 1991) fue uno de las primeras tecnologías que implementó el concepto de Ráfaga como unidad de transporte aunque es la celda la unidad básica de transporte, sin embargo dadas las bondades que se adjudican a OBS esta puede transportar celdas ATM ensambladas en ráfagas OBS.

4. **IMS/OBS**: Sub sistema Multimedia IP o Sub sistema de red de núcleo multimedia IP (3GPP 1999), según su arquitectura definida por el 3GPP, en su modelo TISPAN, IMS aparece como el nivel intermedio entre el nivel de Aplicación/Servicios y el nivel de Transporte en este caso mediante un modelo superpuesto entre IMS (específicamente el módulo CSCF – *Call Sesion Control Function* en sus roles I, S y P) pueda interactuar con el plano de control OBS y posiblemente con el plano de datos, esto mediante la definición de un modelo parcialmente integrado entre IP y OBS. Se recomienda consultar su lista de *releases* para una mejor comprensión de IMS (http://www.3gpp.org).

5. **SIP/OBS**: Protocolo de Inicio de Sesión, en este caso se puede buscar aumentar la funcionalidad del Plano de Control OBS con la implementación de diferentes métodos SIP sobre dicho plano. Aunque se puede requerir de *Parsers* para interpretar los mensajes SIP en el plano de control OBS. Esta opción se puede evidenciar más atractiva que otras dada la importancia de SIP como soporte de señalización para IMS y para *Grid computing*.

6. **H.323/OBS**: Protocolo H.323 de la ITU-T para transporte multimedia, aunque está claro que a pesar de ser un estándar desarrollado con un alto grado de detalle su bajo enfoque WEB (al contrario de SIP que cuenta con notación tipo web[40]) lo han hecho menos atractivo para realizar implementaciones orientadas a la red.

---

[39] Antes de denominarse UIT-T. (Nota del Autor)

[40] Una dirección SIP tiene el formato sip:nombre@compania.com , para la comunicación usando Metodos y Respuestas. (Nota del Autor)

7. **IP/OBS**: Protocolo de Internet (RFC 791 1981; RFC 1883 1995) sobre OBS, emplear OBS para el transporte de datagramas IP sobre la infraestructura OBS. Este ejemplo de interacción ha merecido un trato aparte y muchos autores han hecho propuestas al respecto.

Como se observa, se pueden realizar propuestas de interrelación de casi cualquier tecnología (tanto heredada o *Legacy* como actual) sobre OBS (una especie de X/OBS), sin embargo es posible que la orientación de los diferentes procesos de investigación se enfoquen hacia IP, IMS y SIP principalmente, esto debido a su uso actual y perspectiva hacia redes de próxima generación.

Igualmente, se recuerda que para el análisis propuesto en esta Tesis, se considera que el nivel óptico (o nivel físico) en lo referente al comportamiento de los enlaces WDM o DWDM de la red OBS es ideal, es decir que los efectos lineales y no lineales presentes en los enlaces DWDM no tienen incidencia directa sobre el desempeño de los niveles superiores de la red OBS[41]. Lo anterior implica que los posibles problemas que puedan presentarse sobre el desempeño en la red OBS se deban principalmente a la pérdida de ráfagas y el aumento o variación de los retardos extremo a extremo causados por la variación del tráfico de entrada, dificultades en la asignación de rutas (asignación de recursos), algoritmos de señalización o a otros factores como los mecanismos empleados para el ensamble de ráfagas, ocurrencia de contención y acción de los mecanismos para control de contención.

Se espera que al enfocarse el diseño del CL con métodos cognitivos, ocurra un proceso de **reconfiguración automática** de la red OBS para que su operación no afecte la comunicación de información en el nivel TCP directamente. Es decir, que los efectos de la pérdida de ráfagas por congestión o por la variación del tráfico IP entrante sobre los esquemas de ensamble de ráfagas no sean interpretados erróneamente en el nivel TCP y no comience con la retransmisión de paquetes TCP sin que se requiera, al igual que no desencadene los cálculos de nuevos valores para RTT (*Round Trip Time*) y RTO (*Retransmission Time Out)* en el caso de TCP (Vegas o Reno), estos elementos se retoman más adelante al revisar la interacción entre TCP/IP y OBS.

[41] Este aspecto se supone, ya que realmente siempre se presentan dificultades debido a dichos efectos que están presentes en los enlaces ópticos con WDM.

En consonancia con lo anterior, la figura 3.52, presenta un primer acercamiento a la realización de la propuesta de diseño CL (*Cross Layer*) aplicable a redes OBS, en ella se muestra una primera aproximación a una arquitectura por niveles para la evolución del transporte de IP sobre WDM. Se observa además como el protocolo IP puede interactuar directamente sobre un nivel óptico (parte izquierda de la figura) como una opción a largo plazo, o lo puede hacer a través de una red subyacente o sub red (puede ser una red OPS o una OBS). Igualmente, se define que el nivel óptico está compuesto de enlaces DWDM (multiplexación de lambdas-λ) entre los diferentes nodos que componen el sistema de red.

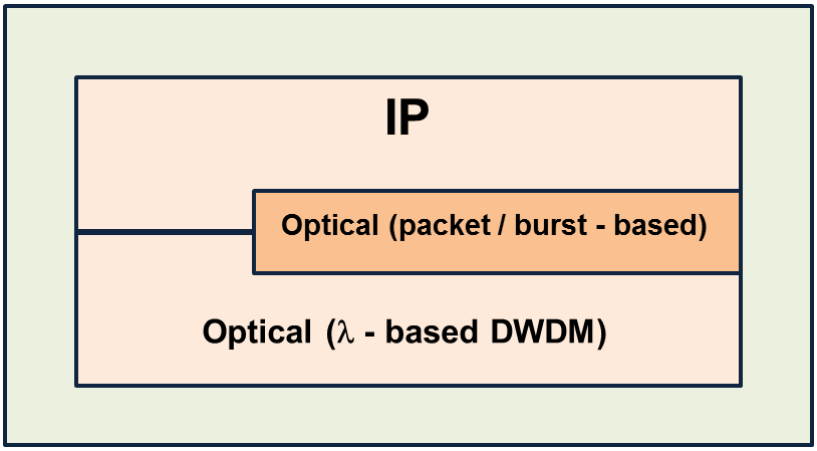


Figura 3.52. Modelo inicial por capas IP sobre OBS e IP sobre WDM

Aunque es un modelo genérico que cuya red “intermediaria” puede ser OCS, OBS u OPS, para este caso se ha seleccionado la conmutación óptica de ráfagas OBS y sobre esta clase de redes se diseñan modelos para soportar la suite TCP/IP.

La figura 3.53 muestra cómo se puede integrar OBS a IP y como IP al pertenecer al nivel de enrutamiento, puede ver a OBS como el nivel de enlace o nivel MAC. Este modelo es aplicable tanto en redes con nodos de funcionalidad distribuida como nodos con control centralizado (WROBS).

Entonces, para construir la propuesta de un modelo orientado a diseño CL se comienza con un modelo general por niveles de las redes OBS como lo muestra la figura 3.54, basado en el modelo definido en Farahmand (2005), Vokkarane & Jue (2002) con algunas precisiones sobre la ubicación y funcionalidad de los diferentes

niveles, anotando que para redes centralizadas sería necesario realizar algunos ajustes principalmente al plano de control, igualmente se muestran las arquitecturas de protocolos OSI y TCP/IP.

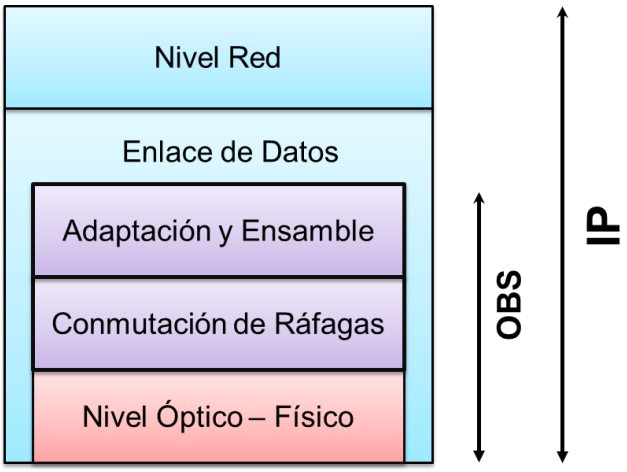


Figura 3.53. IP puede considerar a OBS como un nivel de enlace o MAC

En resumen, las funciones desempeñadas por cada nivel de OBS se muestran en la tabla 3.9.

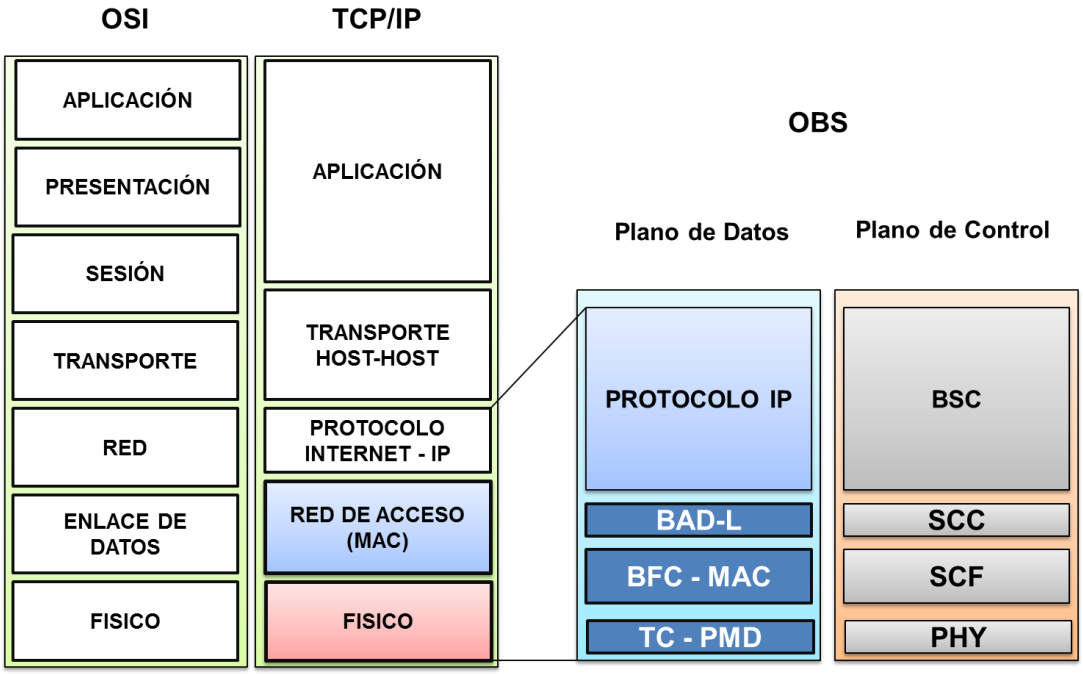


Figura 3.54. Modelo en capas OBS comparado con OSI y TCP/IP

Plano	Nivel	Funcionalidad
Plano de Datos	IP	Transmite y recibe datagramas IP
	BAD (*Busrt Assembler and Dissasembler*)	**8.** Clasifica los paquetes IP dependiendo de la dirección de destino o QoS. **9.** Agrega paquetes en la carga útil de la ráfaga. **10.** Resolución de direcciones IP en OBS MAC. **11.** Desensambla la ráfaga en paquetes IP. **12.** Verificación de número de secuencia (si se requiere). **13.** Control de flujo de transmisión de ráfagas.
	BFC (*Burst Framing Control*)	**14.** Encapsula la carga útil de la ráfaga en una *burst frame* (agrega bandas de guarda y preámbulos y un CRC)
	MAC (*Medium Access Control*)	**15.** Acceso a puertos de salida. **16.** Asignación de ancho de banda y recursos por requerimientos. **17.** Manejo de planificación y control de contención. **18.** Soporte multicasting.
	Nivel físico (*TC/PMD: Transmission Convergence/Physical Media Depended*)	**19.** Determina velocidad de transmisión y capacidad. **20.** Delimitación de la *burst frame*. **21.** Especifica técnicas de transmisión. **22.** Conversión de señales O/E y E/O. **23.** Sincronización y *clock recovery*.
Plano de Control	BSC (*Burst Signaling Control*)	**24.** Implementación de los protocolos de planificación y resolución de contención. **25.** Generación de los BCP. **26.** Implementación de los esquemas de señalización.
	SCC (*Signaling Connection Control*)	**27.** Protocolos de asignación de rutas y reenvío.

	SFC (*Signaling Frame Control*)	**28.** Implementación de los protocolos salto a salto a nivel enlace. **29.** Construcción de la *frame* para el BCP.
	PHY (*Physical Layer*)	**30.** Determina velocidad de transmisión y capacidad. **31.** Delimitación de la *burst frame*. **32.** Especifica técnicas de transmisión. **33.** Conversión de señales O/E y E/O. **34.** Sincronización y *clock recovery*.

Tabla 3.9. Resumen de la funcionalidad OBS

Desde el punto de vista funcional y con base en la tabla 3.9, la figura 3.55 muestra en resumen las funciones que desempeña cada nivel. El nivel correspondiente a OBS incluye la funcionalidad de los planos de control y de datos, por su parte en nivel óptico que incluye el medio físico (enlaces WDM) incluye además la funcionalidad del plano de dato principalmente.

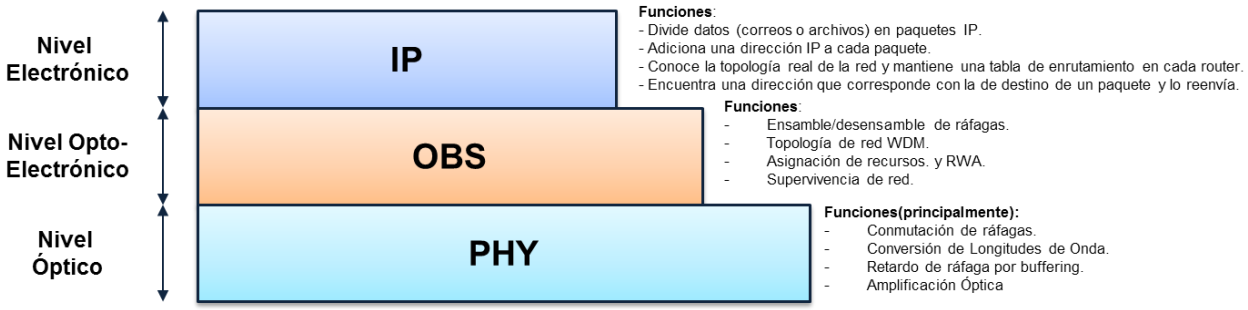


Figura 3.55. Descripción funcional y acciones de los niveles electrónico, opto electrónico y óptico

En cuanto al proceso de adaptación o encapsulamiento de las diferentes Unidades de Datos de Protocolos o PDU (*Protocol Data Unit*), la figura 3.56 muestra un acercamiento de cómo puede llevarse a cabo en cada nodo de borde, se observa como la PDU TCP, se acomoda la PDU datagrama IP y este a su vez forma parte de una PDU DB (*Data Burst*) que finalmente es convertida E/O y transportada al nodo de egreso donde se realiza el proceso de desensamble de la BD en Datagramas IP, que luego se entregan a TCP (o puede ser también al protocolos UDP) que después la envía si es del caso a los niveles superiores.

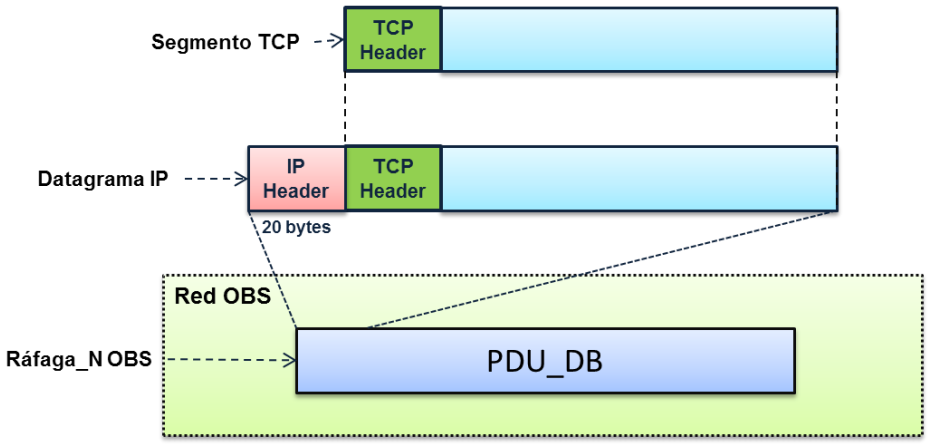


Figura 3.56. Unidades de datos involucradas en la comunicación TCP/IP sobre OBS

Uniendo los conceptos de la anteriores figuras (3.52 hasta 3.56) se propone un modelo de interacción entre capas de la suite TCP/IP y OBS mostrado en la figura 3.57. En esta figura se destaca el proceso de comunicación entre niveles empleando las diferentes unidades de datos.

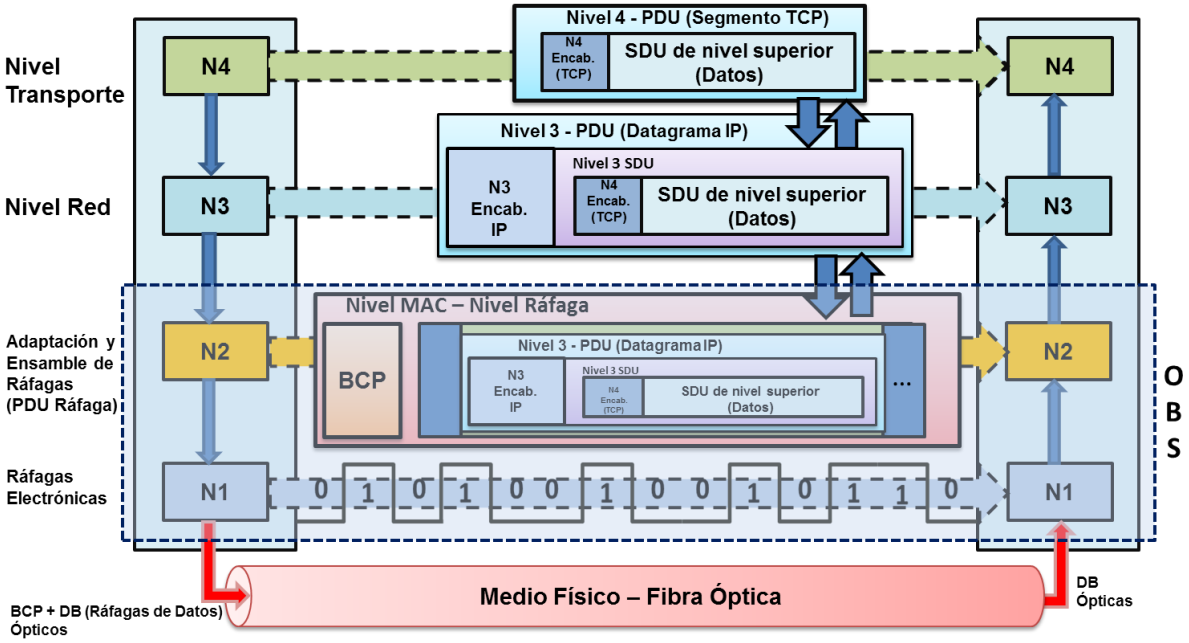


Figura 3.57. Modelo de interacción propuesto para transporte TCP/IP sobre OBS

El proceso de comunicación comienza así: inicialmente se supone que del nivel superior se recibe una unidad de datos que puede denominarse Unidad de Datos de

Interfaz IDU (*Interface Data Unit*) compuesta por dos unidades una de ellas contiene una Información de Control de Interfaz o ICI (*Interface Control Information*) que tiene como objetivo desencadenar alguna función en el nivel 4, por lo tanto se consume en ese nivel y además se envía una Unidad de Datos de Servicio denominada de aplicación o ASDU (*Application Data Service Unit*), a esta SDU se le adiciona un encabezamiento TCP que puede ser llamado Información de Control de Protocolo o PCI (*Protocol Control Information*) que lleva información al nivel par remoto, juntos la PCI y la SDU conforman el segmento TCP, a esta PDU se le agrega una ICI que se entrega al nivel 3, en este nivel se procede como en el nivel anterior, la SDU se separa de la ICI y se procede a conformar la PDU datagrama IP adicionando un encabezamiento IP (típico de 20 bytes para IPv4), en seguida se envía a un nodo de ingreso de OBS donde forma parte de una PDU Ráfaga OBS en conjunto con otros datagramas.

Una vez ensamblada la ráfaga, se genera un BCP o encabezamiento de control de ráfaga (si el método de ensamble es predictivo el BCP se envía antes de que la ráfaga este completamente ensamblada), el cual se envía para configurar la ruta hasta el nodo de egreso o de destino, un tiempo *offset* después se envía la DB. Como se observa en la misma figura 3.57, al nodo de destino solo llega la ráfaga de datos (en algunas ocasiones si el tiempo *offset* es muy grande puede ser que un BCP llegue al nodo de egreso), esta DB es desensamblada en datagramas IP, luego en segmentos TCP y posteriormente se entrega a los niveles superiores realizando un proceso complementario para completar la comunicación extremo a extremo.

Aunque no se había mencionado explícitamente, para los procesos de integración se cuenta con diferentes opciones de implementación. Se los conoce como modelos de integración y son: el modelo superpuesto (*overlay*), el modelo aumentado o integrado y el modelo par (*peer model*). En el modelo *overlay* existe una separación física y lógica entre los niveles TCP/IP (o nivel SIP) y la red OBS (definida como la red de transporte óptico), los mensajes se intercambian extremo a extremo, como lo muestra la figura 3.58, se puede entonces hablar de un dominio TCP/IP y un dominio OBS, en este caso cuando se habla de dominio se refiere al ámbito de acción de cada tecnología.

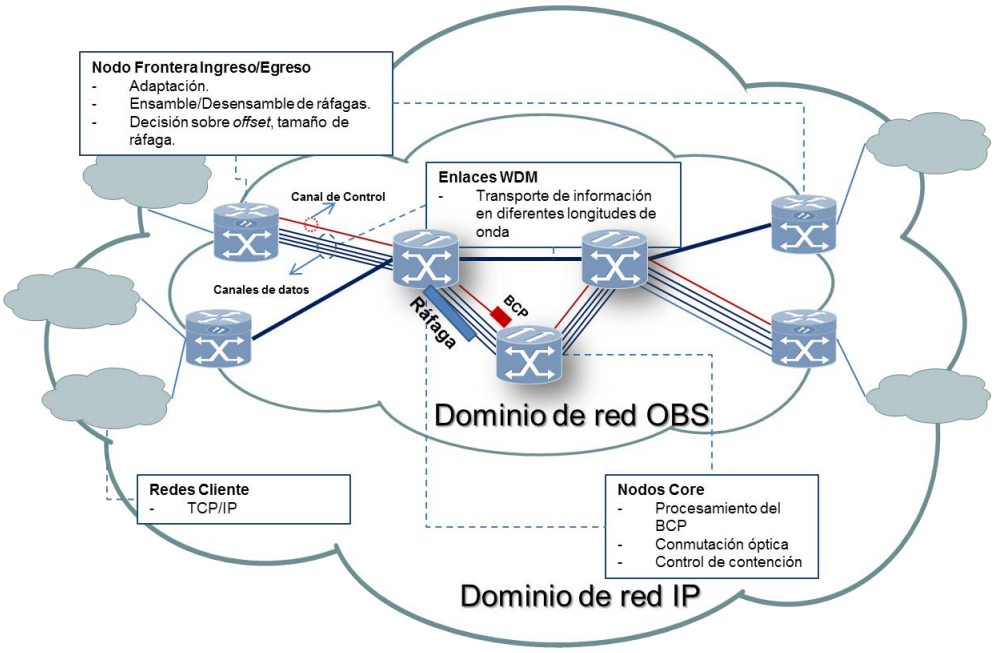


Figura 3.58. Modelo conceptual IP/OBS dividido en dominios

Por su parte en la figura 3.59 se muestra la arquitectura funcional de los planos de control y de datos en una red OBS actuando como red de transporte para la suite TCP/IP, para una conexión extremo a extremo.

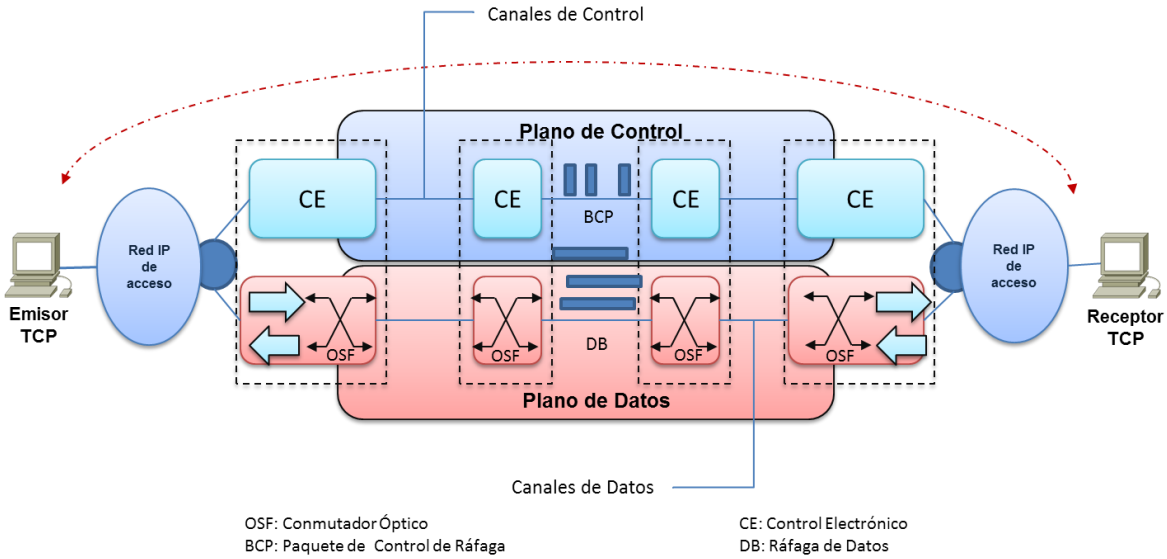


Figura 3.59. Arquitectura funcional por planos en comunicación TCP extremo a extremo

Para un caso en particular de una sesión entre un cliente TCP (Emisor) y un servidor TCP (Receptor) se asume que el diagrama lógico *overlay* del modelo de integración es el mostrado en la figura 3.60. En esta figura se observa como aparece una red de acceso IP que sirve de interconexión entre TCP y OBS, de aquí se puede asumir para efectos de diseño de modelos de desempeño y simulación que la red IP puede tener o no injerencia sobre TCP. Esta observación debe ser considerada cuando se evalúa el comportamiento de TCP sobre OBS en cuanto a la operación de los mecanismos de control de congestión y control de flujo.

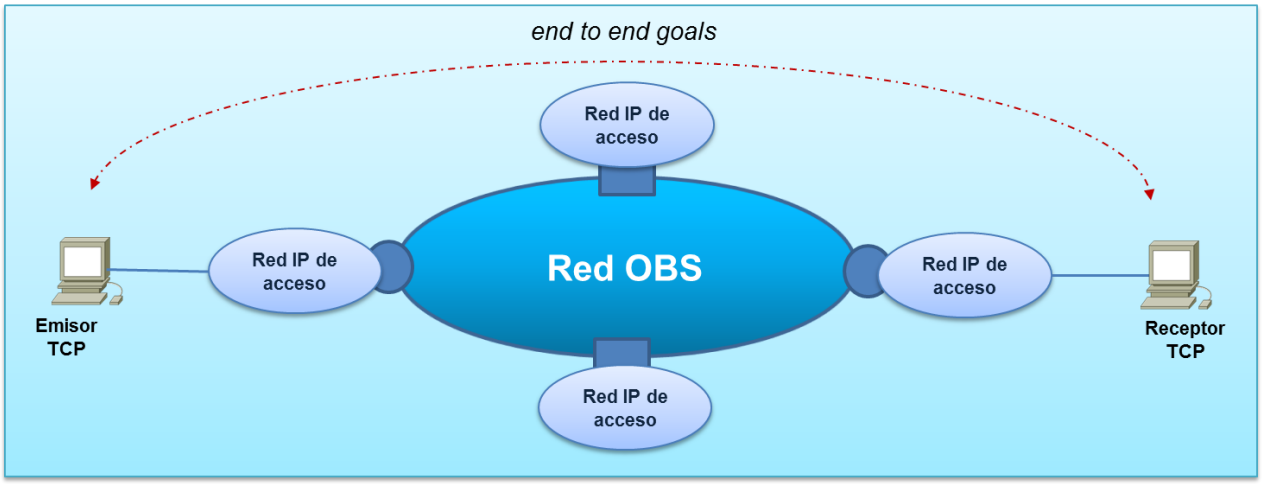


Figura 3.60. Modelo de interacción TCP/IP sobre OBS

Por su parte la figura 3.61 muestra un modelo físico de la red OBS y TCP/IP, en el caso de contar con dispositivos que realicen las funciones de los nodos de borde (ingreso y egreso) al igual que los nodos centrales que transportan las ráfagas, en esta figura, se muestra la funcionalidad del protocolo TCP extremo a extremo, mediante el establecimiento de una conexión debe ser garantizada por la red OBS evitando que el protocolo TCP pierda información o emprenda procesos de control de flujo y congestión que puedan ocasionar una deficiente operación.

Es importante recordar que la operación de TCP es orientada a conexión lo que implica la realización mínimo de tres (3) fases cuando se requiere transportar información. Se cuenta con una fase de establecimiento, una fase de intercambio de información y una fase de desconexión.

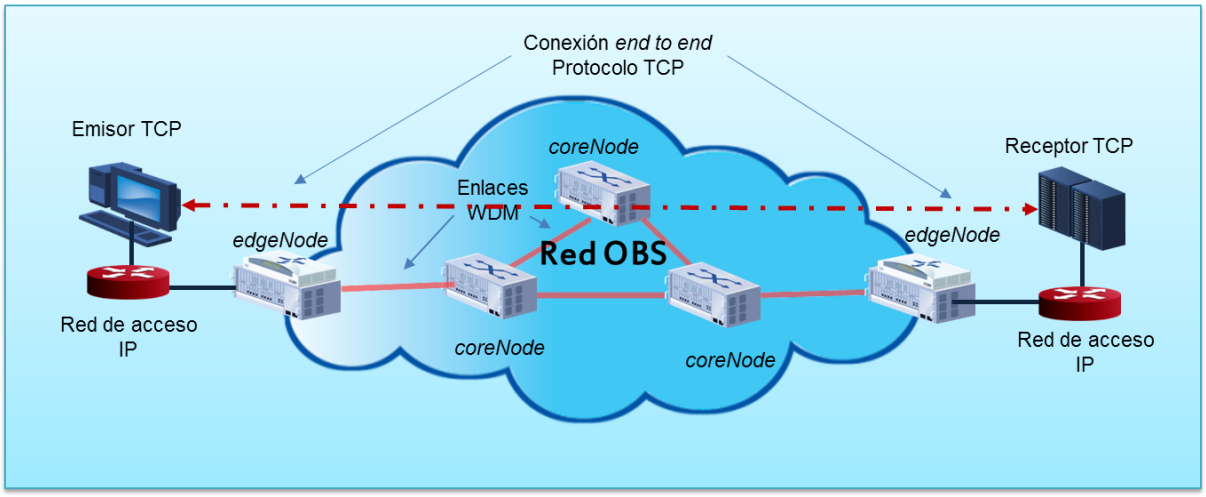


Figura 3.61. Modelo físico de interacción TCP sobre OBS

Como es de esperarse, la opción de soportar TCP sobre OBS responde a las expectativas creadas alrededor de OBS como una de las mejores tecnologías por conmutación óptica para la Internet del futuro. Son muchos los autores que incluyen esta posibilidad pero casi ninguno realiza una propuesta concreta sobre esta interacción, el objetivo de esta sección es mostrar propuestas de posibles escenarios de interacción orientado a *Cross Layer* entre TCP/OBS y entre capas de la red OBS.

- **Modelo *Cross Layer* para OBS**

Tomando en cuenta la figura 3.59 sobre la división por planos de la red OBS y los distintos modelos de CL tratados en la sección 3.3 del presente capítulo, se propone en esta sección un modelo de interacción entre las diferentes capas que conforman la red OBS. La orientación hacia diseño *Cross Layer* a pesar de ser un tema abierto hace una clasificación entre diseños CL que no alteran la división tradicional en capas y los diseños que crean nuevos modelos de interacción, donde se rompe definitivamente con los modelos jerárquicos, se recuerda además que la inclusión de CL no implica simplemente alterar las arquitecturas estandarizadas o que están en vía de serlo. CL debe permitir una interacción entre capas permitiendo además la inclusión de algoritmos que incluyan acciones cognitivas para optimización y adaptación funcional.

La inclusión de CL debe ser cuidadosa ya que nuevas funciones y procesos de comunicación pueden conducir a sobrecarga de información (*overhead*) y posible inestabilidad del sistema. Además de introducir retardos adicionales y al incluir posibles planos o nuevos niveles, los aspectos de gestión pueden adicionar mayor complejidad.

Sin embargo, es una muy buena alternativa cuando se desea incluir mecanismos de control adicionales y en especial cuando estos mecanismos pueden incluir funcionalidades cognitivas ya que el CL puede servir como elemento de control, recepción y entrega de información entre capas de la arquitectura del nodo de red.

La figura 3.62 muestra un ejemplo de CL cognitivo propuesto a partir de la arquitectura ARCO y el modelo de QoS, este CL facilita la interacción entre las funciones de los planos de control y de datos. Es decir el modelo permite interactuar con los entes que realizan las diferentes funciones distribuidas por planos, el CL cognitivo puede cumplir con el intercambio de información entre planos para lo cual utiliza calibración vertical y asocia mecanismos de estados y colas.

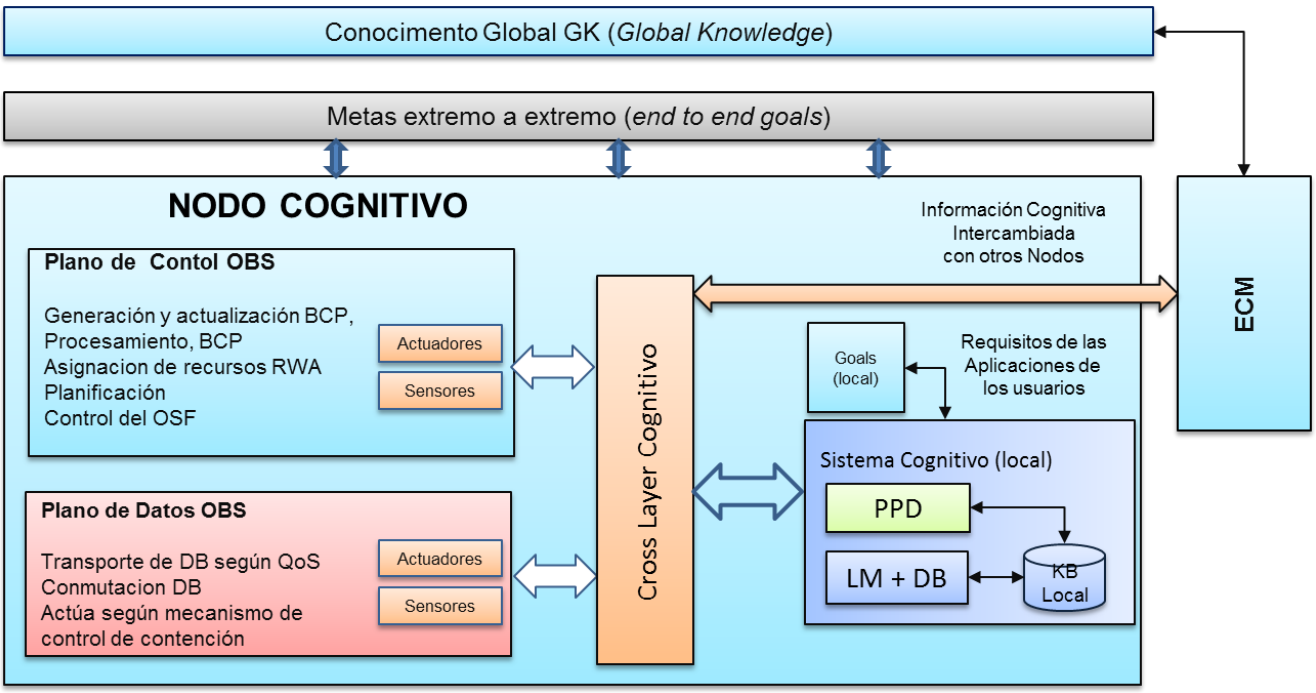


Figura 3.62. Modelo CL orientado a los planos OBS

En seguida la figura 3.63 muestra una propuesta de CL donde se evidencia la interacción del CL con las capas OBS, las funciones por niveles son las definidas en la figura 3.55.

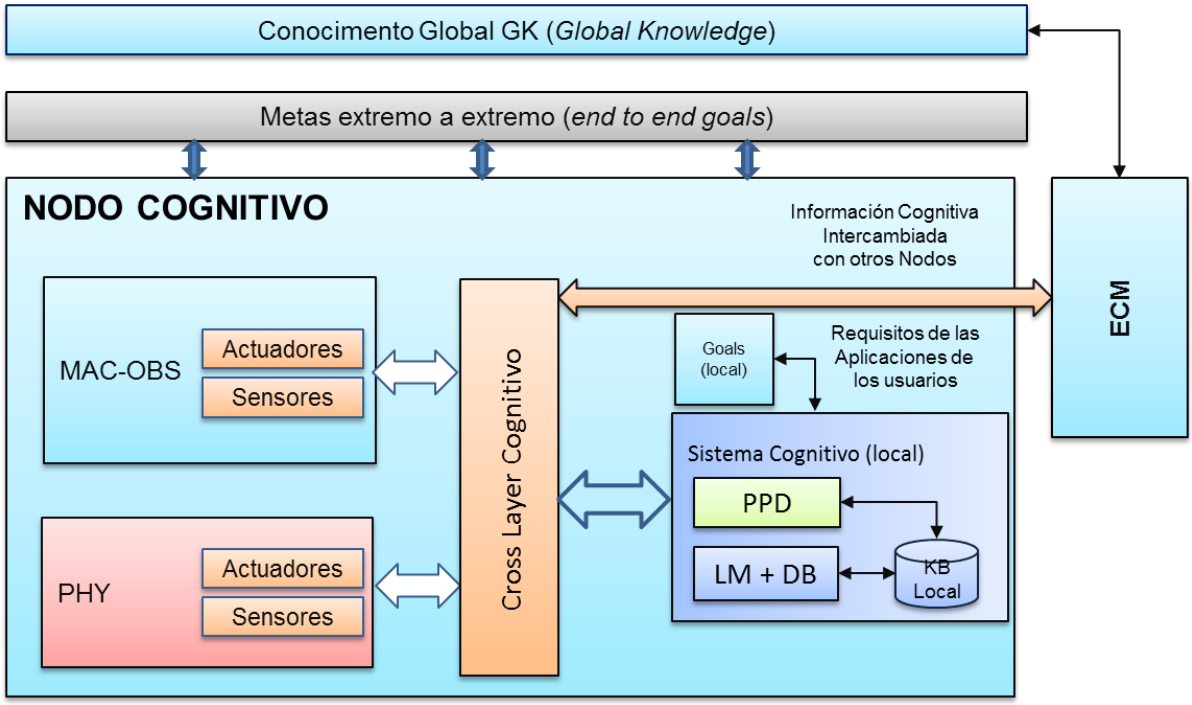


Figura 3.63. Modelo general de CL para un nodo OBS

Igualmente, se evidencia la presencia de elementos de actuación y sensores los cuales pueden constituirse en un primer acercamiento a contar con niveles MAC-OBS y PHY cognitivos. Para incluir mayor cognicion en los niveles, estos pueden dotarse de agentes inteligentes que actúen sobre la funcionalidad de cada nivel. Esto agrega más cognición y complejidad. Los procesos de intercambio de información se hacen mediante calibración vertical aunque también incluye comunicación horizontal. Internamente el CL es una agente de comunicaciones.

La figura 3.64 muestra la abstracción de lo que puede ser un CL visto como un módulo que recibe y entrega información, procesa mensajes mediante procesos que poder describirse a través de máquinas de estados finitos y *buffers*. En el caso de involucrar métodos cognitivos y en la medida que esto métodos ayuden a optimizar algunas funciones, el CL puede indicar trasportar la información sobre nuevas rutas (optimizadas como resultados de aplica meta heurísticas y métodos cognitivos), o

cuando se definen las diferentes opciones de ensamble de acuerdo con la acción de un proceso de aprendizaje de máquina.

Para comunicación entre niveles se pueden emplear llamadas a buzones, colas FIFO, piscinas de datos marcados (urgentes) y pilas LIFO. La información que se recibe o envía se intercambia con los diferentes niveles que componen el nodo.

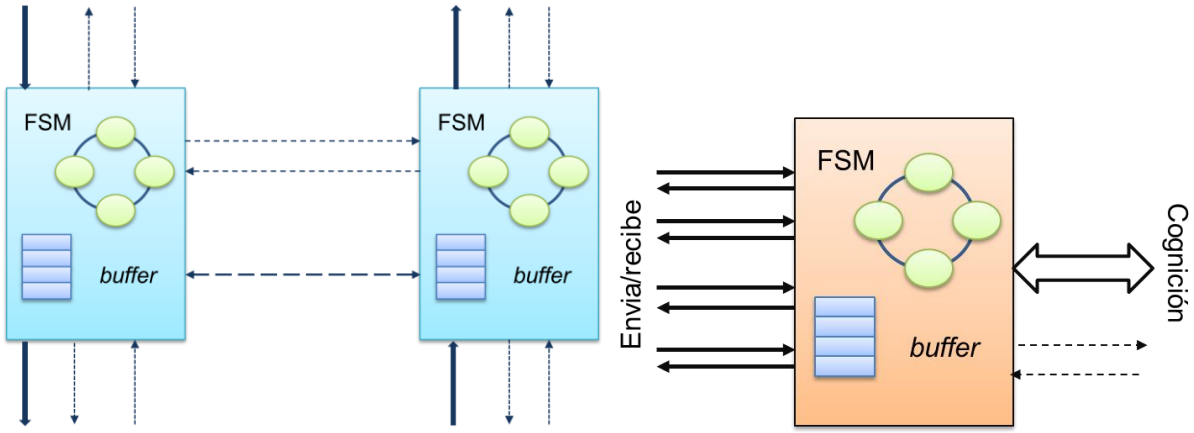


Figura 3.64. Abstracción de un modelo de nodo de red y de un CL

El estado del nodo se conoce mediante las MEF y la memoria de los eventos relevantes almacenados en el mismo. De otro lado, los niveles deben intercambiar información con los demás niveles (comunicación vertical) y con el CL (comunicación horizontal). En un proceso de interacción extremo a extremo, los niveles deben conservar su estructura de mensajes y sus procesos de comunicaciones similares a como se definen en los estándares.

- **Modelo *Cross Layer* para TCP sobre OBS**

Algunas veces se puede pensar que la mejor forma de sacar provecho a los modelos orientados al diseño CL es cuando la red OBS sirve como sub red para los protocolos TCP/IP, de acuerdo con este enunciado se procede a definir un modelo CL para esta clase de interacción principalmente en diseño *overlay*. Aunque no es la única opción ya que se puede trabajar el modelo *merge* y el modelo par a par o P2P (*Peer to Peer*), sea la decisión que se tome, su diseño debe incluir componentes cognitivos.

Se ha expresado anteriormente que el protocolo TCP es uno de los más empleados en la actualidad para transporte de información y se espera que lo siga siendo durante mucho tiempo, sus mecanismos de acción han sido objeto de diferentes trabajos de investigación lo cual ha dado lugar a la aparición de diferentes clases de TCP dependiendo de la forma como realiza sus procesos de control de flujo y control de congestión. En otras palabras las diferentes implementaciones de TCP definen diferentes mecanismos de retransmisión, lo que implica el manejo de diferentes fases de retransmisión. Durante el periodo de retransmisión la denominada ventana de congestión de TCP *cwnd* (*congestion window*) no puede aumentar su tamaño, entonces TCP solo puede enviar algunos pocos paquetes y en ocasiones ningún paquete en cada ronda de envío. Debido a esto se han hecho estudios sobre la incidencia que pueden tener los retardos en OBS cuando transporte información TCP, los resultados preliminares muestran que los procesos de ensamble de las ráfagas, así como la pérdida de ráfagas por contención u otras causas, puede impulsar a que TCP tome acciones de control de transmisión que pueden impedir el envío de datos o desencadenar procesos de control de flujo y congestión que afectan su normal desempeño.

Igualmente, en la literatura se encuentran diferentes versiones de TCP como TCP Reno, Vegas, Fast TCP, New Reno y SACK sobre los cuales se han hecho medidas de *throughput* respecto a diferentes variables como el tamaño de las ráfagas y los mecanismos de ensamble. Estas versiones se diferencian principalmente en la forma como realizan medidas de tráfico para detectar congestión. Otro aspecto a recordar es la importancia de TCP ya que por ser un protocolo orientado a conexión, permite una conexión confiable para una sesión extremo a extremo, debido a esto se le hace responsable de la calidad de servicio en la comunicación.

Con los elementos anotados anteriormente y la información consignada en el Apéndice I, se constituye en un aspecto importan la interacción entre TCP y OBS.

Como ambientación se proponen las gráficas de figuras 3.65 a) y b) donde se muestra una forma de interacción entre TCP/IP y OBS visto como un modelo en capas, la pila (*stack*) de protocolos TCP/IP descansa sobre la pila de protocolos OBS y esta a su vez realiza el proceso de comunicaciones mediante enlaces WDM (o DWDM). La figura 3.65 a) muestra la ubicación de la suite TCP/IP respecto a la pila o

stack de protocolos definidos para OBS, asimismo muestra la existencia de mecanismos de comunicación entre ambos denominadas *gates* o compuertas, se aclara que la comunicación bidireccional se logra mediante procesos de resolución de direcciones y mecanismos de adaptación similares a los empleados para soporte de TCP/IP sobre Ethernet o TCP/IP sobre ATM.

En la figura 3.65 b) se relaciona directamente TCP con OBS para un caso puntual de estudio sobre los mecanismos de control de flujo y congestión en TCP, en este caso la operación del protocolo IP se considera normal, es decir no es causante del comienzo de acciones de control por parte de TCP.

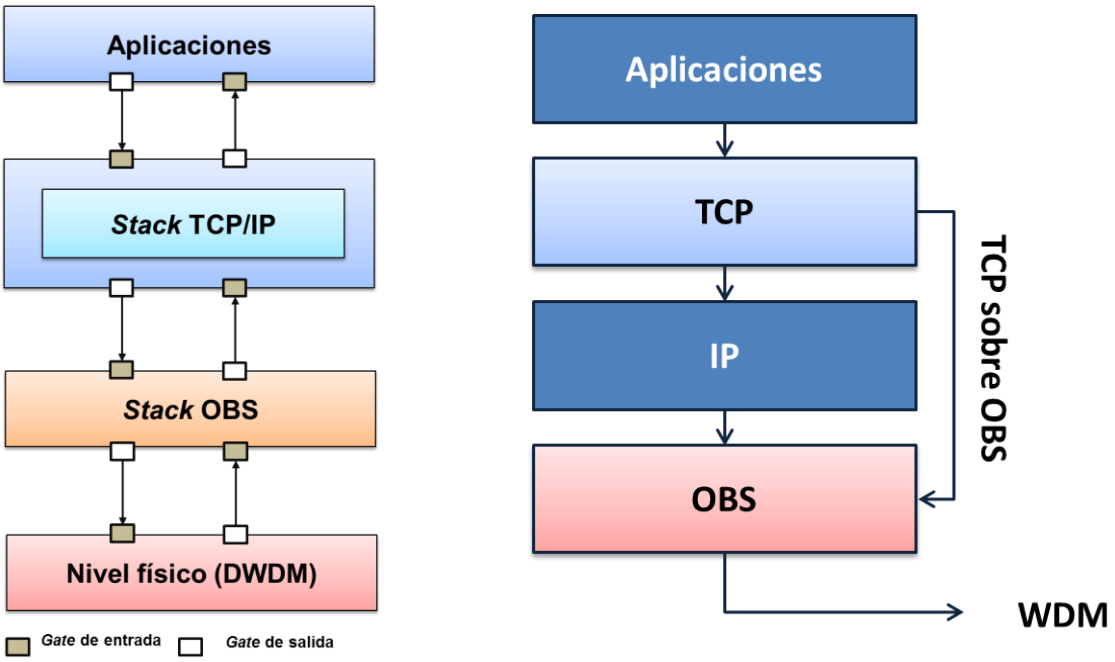


Figura 3.65. a) y b) Visiones similares de una Arquitectura TCP/IP sobre OBS

- **Organización de la pila de Protocolos**

En principio, el nodo a simular puede contener componentes globales y componentes locales, la figura 3.66 muestra una primera aproximación al modelo de interacción entre la suite TCP/IP y la red OBS a través de un modelo de calibración vertical denominado CL-TCP/OBS (*Cross Layer* TCP sobre OBS).

En la parte alta de la pila se encuentra el nivel de aplicaciones APP (*Application*) desde el cual se envían los diferentes requisitos de las aplicaciones que se soportan (aplicaciones de voz, datos y video), los niveles que se encuentran subyacentes son TCP (*Transmission Control Protocol)* e IP (*Internet Protocol*), como se conoce, en los RFC´s sobre la suite de protocolos TCP/IP no se hace una definición sobre la sub red (niveles 1 y 2) exclusivos para esta arquitectura, es por esto que para el caso puntual tratado en esta Tesis se toma como red subyacente a la red OBS, la cual está compuesta por nodos de borde y nodos de núcleo.

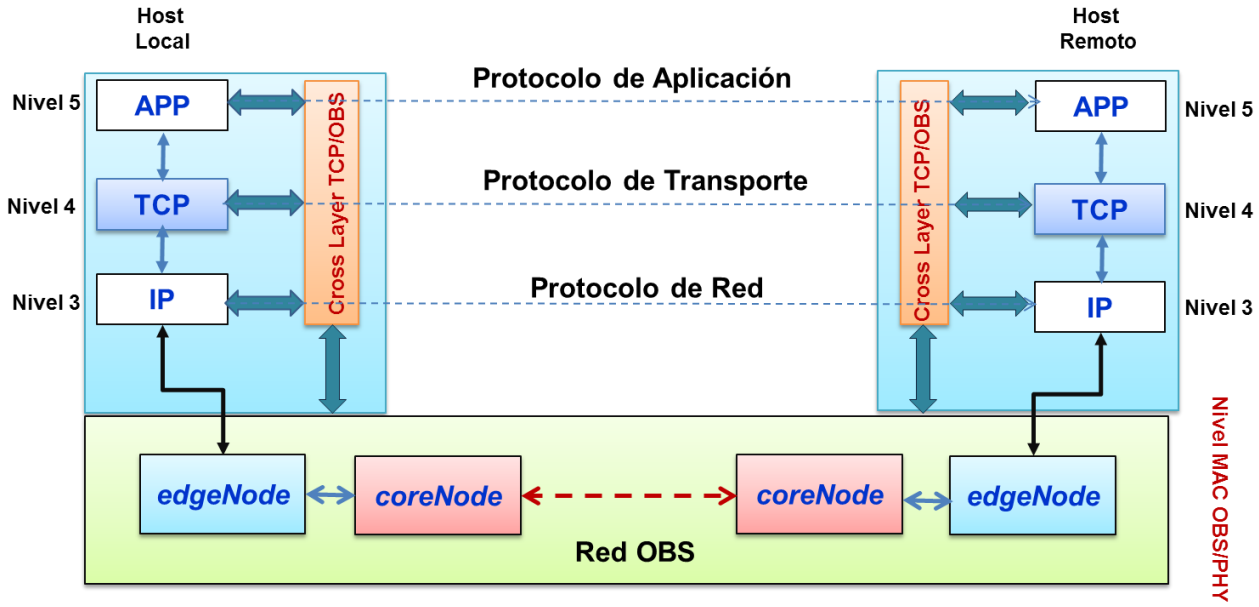


Figura 3.66. Propuesta de un diseño orientado a *Cross Layer* para TCP/OBS (CL-TCP/OBS)

Como lo muestra la figura 3.66 cada nivel dentro de la jerarquía realiza una serie de funciones que intercambian información con un nivel vertical que permite el intercambio de información entre los diferentes niveles de la pila de protocolos. Igualmente, se pueden definir interfaces genéricas para el intercambio de información entre los niveles de la pila de protocolos (especialmente entre TCP/IP y OBS).

- **Trayecto para los datos**

Para enviar y recibir mensajes se propone emplear APIs como *sendDowm* () y *sendUp*(); *handleLowerMsg*() y *handleUpperMsg*() para recibir datos desde y hacia

niveles superiores o inferiores. Otra opción puede ser a través del empleo de campos disponibles en los formatos para intercambio de datos en TCP e IP.

Existen otras alternativas como emplear las etiquetas de GMPLS y encabezamientos adicionales a los mensajes ICMP propios de la suite TCP/IP.

- **Intercambio de Información de Control**

La optimización por *Cross Layer* es posible a través del intercambio de información de señalización a lo largo de la pila de protocolos. Se propone que dicho intercambio puede hacerse a través de la interfaz específica que puede verse como un conmutador de mensajes entre todos los niveles interactuantes en el mismo nodo (nodo de ingreso y los protocolos superiores), los mensajes de control o *controlMessages* son enviados de un nivel fuente a un nivel destino a través del *Cross Layer*, los destinos y fuentes son identificados mediante un único *layerIdentifier*.

Este esquema permite a cualquier nivel de la pila de protocolos emplear un método *sendControl()* con un *controMessage,* y transmitir un mensaje información de señalización a través del *stack* o pila de protocolos local. Un ejemplo en OMNeT++ puede ser:

```
message QueueCreateNewNeighbourMessage
extends ControlMessage {
fields:
int idNeighbour;
int nbPriorities;
};
```

Este mensaje puede ser usado para crear nuevas colas de prioridad cuando se detecta un nuevo vecino (aquel cuya dirección es *idNeighbour*). Un mensaje similar existe para borrar nodos vecinos, para el caso de arquitecturas dinámicas, como la realización concerniente se supone estática, en principio la red OBS de prueba tiene esta característica. Otros procesos y definiciones de modelos de comunicación se pueden explorar mediante XML (*eXtensible Markup Language*) y el modelo de

comunicación gestor/agente empleado en algunos protocolos de gestión basados en OSI y en SNMP (*Simple Network Management Protocol*).

Finalmente, la tabla 3.10 muestra un compendio de las características del *Cross Layer* propuesto vinculando procesos cognitivos tomados de la arquitectura ARCO.

Característica	Explicación
Compatibilidad hacia atrás	Si, con los modelos jerárquicos heredados (*legacy*)
Tipo de información que maneja	Información de contexto de la red y de los nodos que la componen
Control del estado de la red	Puede tener control sobre el estado de la red aunque en principio se busca que ayude principalmente en procesos de comunicación
Cognición	Permite la inclusión de métodos cognitivos
Optimización	Al permitir cognición esta característica puede contribuir con una mejor operación de la red
Global o local	Su propuesta implica inicialmente el manejo de un contexto local, aunque mediante interfaces de comunicación hacia los módulos de gestión puede alcanzar contextos globales.
Estandarización	Toma elementos de las propuestas más usuales en diseño orientado a CL pero como está en fase primaria no se trata de una versión estandarizada.
Modelo de comunicaciones	Emplea calibración vertical con intercambio de información
Interfaces	Definidas hacia TCP/IP hacia OBS y hacia los módulos de cognicion.
Compatibilidad con TCP/IP	En los procesos de implementación y pruebas puede asegurarse una mejor compatibilidad
Compatibilidad con OBS	En los procesos de implementación y pruebas puede asegurarse una mejor compatibilidad

Tabla 3.10. Resumen de características de modelo CL-TCP/OBS

3.5. Conclusiones del Capítulo

Con todas las definiciones revisadas y consideradas en el presente capítulo se puede concluir que una red cognitiva es aquella que cuenta con la capacidad de adaptación en respuesta a diferentes condiciones o eventos basados en el razonamiento y conocimiento adquirido previamente, después de cierto tiempo de operación, esta capacidad se logra mediante la incorporación de uno o más procesos o métodos cognitivos que se encargan principalmente de percibir las condiciones reales de la red y con esta información realiza planes, toma decisiones y actúa sobre esas condiciones sin perder de vista las metas extremo a extremo. Después de esto la red puede aprender de lo ocurrido, guardar esta información y emplear estos resultados para la toma de decisiones en un futuro. Sin lugar a dudas se resalta la importancia del Plano de Conocimiento y la inclusión del ciclo cognitivo como factores decisivos en la evolución de las redes tradicionales.

Debido a los retos que se presentan a las infraestructuras de redes actuales (alambradas, inalámbricas y ópticas) la cognición se presenta como el mejor candidato para controlar las redes del futuro. Esto implica que para obtener una red completamente cognitiva es necesario enfrentar muchos retos de investigación en los años venideros, hasta el momento se cuenta con muchas propuestas de arquitecturas conceptuales de redes ópticas y algunas propuestas preliminares de lo que debe ser un nodo cognitivo, como elemento esencial en una red.

Es importante trabajar sobre modelos que puedan llegar a ser estandarizados y considerados como modelos globales. Pero aún se requiere de modelos que sean probados para evaluar su desempeño ante el soporte de diferentes servicios, con diferentes requisitos, calidades, calidad de servicio, entre otros.

Cuando se intenta proponer un modelo de diseño orientado a Cross Layer es importante recordar que no se cuenta con modelos estandarizados, que continua siendo un campo abierto y que la gran mayoría de desarrollos se han orientado hacia entornos inalámbricos, y especialmente para control de funciones a nivel físico, debido a la importancia que presentan características como ahorro de potencia, movilidad y la gestión que se hace del espectro radio eléctrico.

El diseño orientado a CL puede incrementar el desempeño de la red a través de permitir explotar las interacciones entre diferentes niveles de protocolos. Aunque puede agregar complejidad al sistema, se debe tener cuidado de no sobrecargar la red y crear posibles escenarios estilo espagueti. Se sugiere comenzar con modelos ligeros y que sean compatibles con las arquitecturas jerárquicas por niveles, no se recomienda romper con las arquitecturas estandarizadas ya que puede crear una explosión de propuestas todas incompatibles entre sí.

En el entorno mundial, el éxito de Internet ha estado dominado por las arquitecturas en capas y jerárquicas, sin embargo el estricto diseño por niveles no permite la flexibilidad y el dinamismo que exigen las comunicaciones de próxima generación que estarán dominadas por entornos inalámbricos y el transporte de grandes volúmenes de información a cargo de las infraestructuras ópticas. Por lo tanto una explotación adecuada de los diseños orientados a CL en la interacción entre protocolos pueden ayudar a lograr un desempeño más eficiente de las distintas pilas de protocolos en diferentes ambientes.

Capítulo 4

Diseño de Escenarios y Modelos de desempeño y Simulación

4.1. Introducción

En el presente capítulo se consignan los procesos de diseño de los diferentes escenarios utilizados en la simulación de la propuesta sobre el desarrollo de métodos cognitivos aplicados en los nodos de una red OBS, igualmente, como se espera tener un diseño orientado a *Cross Layer*, se utilizan las arquitecturas propuestas en el Capítulo 3 (elementos de la Arquitectura Cognitiva propuesta y del modelo de *Cross Layer* definido), vinculando además la suite de protocolos TCP e IP.

Tomando como base la arquitectura de la red OBS (estudiada en los capítulos 1 y 2, con la propuesta hecha en el Capítulo 3) se hace un modelo de red orientado a componentes se diseñan los nodos de borde y nodos centrales de la red OBS partiendo de condiciones que se asumen para lograr un diseño acorde con los modelos de red más utilizados a nivel de investigación.

Igualmente para la definición de los aspectos metodológicos que sirven de guía para la construcción del presente capitulo se ha elaborado un documento denominado Apéndice D que describe una serie de elementos procedimentales cuando se

abordan acciones sobre simulación de eventos discretos, los modelos[42] empleados para simulación corresponden en principio a abstracciones de un sistema real y el modelo obtenido se trata de una representación reducida del sistema considerado al principio, el cual se puede basar en simplificaciones, restricciones y aspectos que se asumen.

Según estos lineamientos cuando el modelo realizado se utiliza para el **análisis de desempeño**, como en este caso, al modelo se lo llama **Modelo de Desempeño**, el cual debe convertirse en un **Modelo de Simulación** una vez se hayan definido los aspectos puntuales que lo definen y componen. Para obtener estos modelos se debe contar con una serie de elementos que se van logrando paso a paso.

En la definición del Modelo de Simulación en principio se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

- **Eficiencia**: se refiere al empleo de tiempos moderados de simulación en relación con la complejidad del modelo que se representa. La red que se representa corresponde a una red OBS por conmutación de ráfagas, se comienza con una red sencilla de cuatro (4) nodos de topología regular y para el diseño final se toma en cuenta la NFSNeT con topología irregular, esta red corresponde a un modelo de red desplegada en Estados Unidos y que es empleada en innumerables estudios de investigación. Existen muchos otros modelos de redes que pueden tener topologías más complejas como GEANT, EON entre otras, sobre estas se plantean posibles escenarios, pero el estudio inicial y central se basa en NSFNeT. Esto hace que se cuente con ciertos parámetros que pueden asumirse para inicialización de la red (topología, número de nodos, enlaces, distancias), al trabajar sobre estos modelos de red se espera que la complejidad de las propuesta se mantenga en valores lineales.

- **Verificabilidad**: los modelos de simulación y de desempeño deben tener características similares, se deben comparar para verificar que tanto los modelos de desempeño están representados en los modelos de simulación obtenidos. En

[42] En este contexto, se considera que un Modelo es la abstracción del sistema real y no el prototipo obtenido (modelo de referencia) después de haber hecho las pruebas de validación sobre el mismo y que puede tomarse de modelo para ser implementado en escenarios reales.

este caso de estudio, se toma un modelo de red OBS basado y definido principalmente en las patentes de la tecnología (modelo general de una red OBS) y en la literatura consultada, así como su comportamiento y funcionalidad las cuales están acordes con las definiciones hechas por sus creadores (Qiao & Yoo 1999). Todo esto permite verificar que los modelos de red definidos corresponden a una red por conmutación óptica de ráfagas OBS (*Optical Burst Switching*) en principio con proceso distribuido nodo a nodo, se busca entonces obtener un modelo de simulación acorde con la funcionalidad de OBS.

- **Calidades y cualidades del código**, aunque existen diferentes métricas para evaluar la calidad del código obtenido se espera que al emplear la herramienta OMNeT++ (http://www.omnetpp.org/) basada en el lenguaje de programación C++ orientado a objetos y el lenguaje de descripción de red NED se logre un código que cumpla con los objetivos de representar la funcionalidad de las redes OBS. Se emplea igualmente el entorno de programación eclipse (http://www.eclipse.org/), por lo tanto el estilo de codificación y definición de algoritmos que se sigue es el usado en esta comunidad OMNeT++. Ya que esta herramienta corresponde a un verdadero entorno integrado de desarrollo IDE donde se cuenta con las herramientas de depuración sintáctica y lógica que permiten detectar errores de codificación y posibles faltantes. A manera de nota al margen se define que en la Comunidad OMNeT++ es común emplear en los nombres de funciones y variables escritura de la forma $nombreFuncion()\ y\ nombreVariable$, `virtual void handleMessage(cMessage *msg)`, igual notación se emplea en la escritura de los algoritmos que describen el comportamiento de los diferentes módulos que constituyen el sistema. Finalmente se anota que un modelo de desempeño no es universal y generalmente no es reusable en su totalidad.

Aunque pueden existir y de hecho es así, otras alternativa para desarrollo de procesos de simulación de eventos discretos, se procede con el modelo propuesto ya que se considera puede cumplir con los alcances del mismo y se adapta a otras metodologías que se emplean tanto para diseño de las redes OBS como para la obtención de plan de pruebas.

4.2. Elaboración de los Modelos de Desempeño y Simulación

4.2.1. Ambientación Inicial

Para la obtención de los modelos de desempeño y simulación se siguen en general los siguientes pasos:

1. Definición de los escenarios de prueba.
2. Obtención de las redes de prueba (Modelos Lógico y Físico).
3. Diseño de los métodos cognitivos.
4. Prueba de las redes sin métodos cognitivos.
5. Prueba de las redes con métodos cognitivos.
6. Comparación de resultados.
7. Conclusiones.

Al aplicar estos pasos generales por ejemplo a un solo escenario es posible obtener un conjunto de modelos de simulación para cada tipo de red *Full Mesh*, NSFNeT, EON y GEANT2.

Para guiar el estudio de evaluación del desempeño de las diferentes propuestas de red se acude a la información incluida en el Apéndice D, donde se muestra como un estudio de evaluación de desempeño soportado en simulación contiene una serie de pasos como se muestra en la figura 4.1, aunque esta serie de pasos puede considerarse como una metodología de desarrollo a seguir, no es camisa de fuerza y es susceptible de ajustes.

Sin embargo para este estudio se sugiere el seguimiento de estos pasos o fases que sirven de guía en la búsqueda de aplicar los diferentes conceptos estudiados para la obtención de los distintos escenarios de prueba y revisar los resultados obtenidos. En el diagrama se muestra como al avanzar algunos pasos es posible si se requiere, devolverse a pasos ya recorridos, es decir se puede manejar una línea jerárquica de desarrollo pero también se puede incluir comportamiento *Cross Layer* en el mismo.

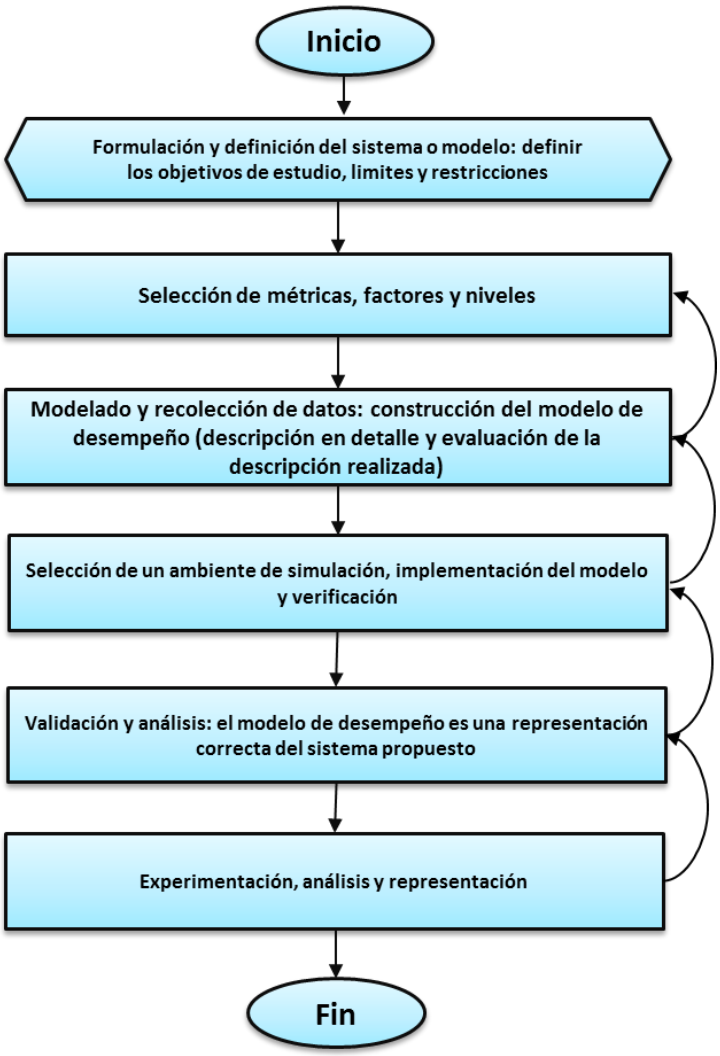


Figura 4.1. Procedimiento propuesto para elaborar Modelos de Desempeño y Simulación

4.2.2. Desarrollo de la metodología propuesta

En seguida se procede al desarrollo de los pasos o fases propuestas dentro de la metodología que se muestra en la figura 4.1, en algunas fases se han hecho algunas modificaciones en la toma de acciones y en otras se han definido algunas restricciones para la obtención de los modelos de desempeño y simulación, aspectos claves en el diseño de redes. Igualmente, los modelos de red OBS de prueba se generan a partir de la abstracción y adaptación de la metodología para el diseño de redes *top-down*. Estas variaciones o aportaciones se describen en el momento de hacerse efectivas en la medida que se avanza en el Capítulo.

Fase 1. Formulación y definición del sistema o modelo

Corresponde al punto de partida para el presente desarrollo, consta de los siguientes ítems.

a. Propósito del estudio de evaluación.
b. Aspectos que se asumen, límites, restricciones y simplificaciones realizadas.
c. Cambios y ajustes realizados y razones para dichos cambios.
d. Para que casos es útil y cuales caso no.

a. Propósito del estudio de evaluación

Acorde con los objetivos de la Tesis los cuales se abordaron en la Introducción General al presente documento, lo que en esencia se busca es realizar una evaluación del desempeño de una red OBS mediante la inclusión de métodos de control cognitivo basados en meta heurísticas en sus diferentes componentes (nodos de la red OBS). Estos métodos se incluyen en algunas funciones propias de la red siguiendo la especificación funcional definida para redes OBS mostrada en figura 1.24 del Capítulo 1, la cual para efectos de ubicación conceptual se recrea en la figura 4.2.

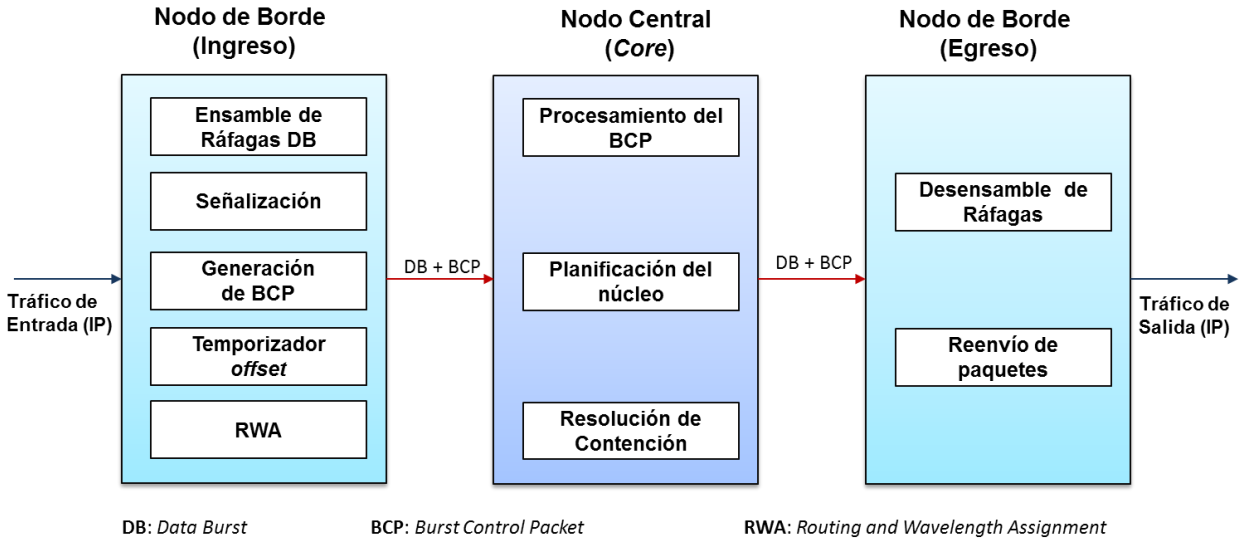


Figura 4.2. Modelo Funcional de una red OBS

El desarrollo de los métodos cognitivos se basa en meta heurísticas (Talbi 2009) que trabajan con poblaciones (estas pueden generarse aleatoriamente o puede ser por diversificación) como es el caso de los Algoritmos Genéticos GA (forma parte de los algoritmos evolutivos), Optimización por Colonia de hormigas ACO (*Ant Colony Optimization*), la Optimización por Enjambre de Partículas PSO (que forma parte de los *Swarm Intelligence*) y igualmente se acude a las Redes Neuronales Artificiales ANN (*Artificial Neural Networks*), esta última basada en la funcionalidad del cerebro humano. Todas estas meta heurísticas están clasificadas dentro de los mecanismos inspirados biológicamente. Y se basan en la arquitectura cognitiva ARCO propuesta en el Capítulo 3. Más adelante al desarrollar cada algoritmo que representa estas meta heurísticas (métodos de control cognitivo) se definen sus características y funcionalidad con mayor detalle.

b. Aspectos que se asumen, límites, restricciones y simplificaciones

Como se ha expresado con anterioridad, durante el desarrollo de los diseños y pruebas se realiza una comparación con el sistema OBS considerado como básico o de partida que corresponde a una red OBS cuya funcionalidad se puede considerar estándar ya que no posee mecanismos que tengan relación con las meta heurísticas consideradas y tampoco incluyen mecanismos cognitivos. Sin embargo se debe tener en cuenta que este modelo inicial o modelo base de red OBS se ha configurado con funciones y valores de parámetros empleados en diferentes estudios sobre redes OBS (referencias). Igualmente se pone de manifiesto que los procesos de diseño y simulación se realizan sobre modelos de red OBS distribuidos, al contrario de su versión WROBS que opera con control centralizado. Aunque la mayoría de trabajos de investigación se basan en esta clase de redes (redes tipo WRON).

Luego en los modelos anteriores se incluyen los métodos cognitivos basados en las meta heurísticas GA, ACO y PSO, seguido de la red ANN propuesta, con estos métodos adicionados se procede realizando un nuevo análisis de desempeño de los modelos propuestos sobre la red OBS y en posteriormente se incluye la cognición (específicamente que cumpla con la funcionalidad el ciclo cognitivo incluido en ARCO). Se espera de esta forma obtener un análisis definitivo que muestre la incidencia de estos métodos cognitivos en la red OBS.

Debido a la naturaleza de los procesos de ensamble de ráfagas, y en especial los problemas relacionados con el enrutamiento y asignación de longitud de onda RWA, algoritmos como los de tipo evolutivo (Talbi 2009), no permiten establecer una solución exacta encontrando el valor óptimo en el menor tiempo posible, sin embargo, permiten encontrar una respuesta muy aproximada a la óptima, que asegure buen rendimiento y calidad de acuerdo a los recursos usados. Los algoritmos heurísticos son los responsables de generar este tipo de soluciones en tiempos relativamente cortos. Igualmente, según su clasificación, estos algoritmos pertenecen a métodos de búsqueda y optimización, lo cual implica que empiezan a operar a partir de una solución (población inicial) y mediante su operación intentan mejorarla.

En general en su descripción funcional las redes OBS muestran una serie de mecanismos entre ellos clases de servicio CoS y prioridades que son adicionados a su funcionalidad básica, sobre estos mecanismos se consideran algunos límites y restricciones para la realización de algunas pruebas, por ejemplo:

- En algunas ocasiones para desplegar la funcionalidad de la red OBS en cuanto a los nodos de borde se pueden emplear clases de servicio CoS, prioridades, direcciones reales de red OBS e IP, formatos modificados de BCP, diferentes mecanismos de señalización y planificación, igualmente, la llegada del tráfico puede ser dinámica y con comportamientos que exhiban distintas funciones de probabilidad (Poisson, exponencial, uniforme, normal truncada). Mientras que los nodos centrales pueden o no contar con mecanismos para control de contención, es posible que estos nodos estén equipados con conversores de longitudes de onda o se presente la restricción en la continuidad de longitud de onda, o se cuente con mecanismos de retardo como FDL entre otros. Por lo tanto para la configuración de los diferentes escenarios de prueba, se presenta un listado de características del modelo a construir incluyendo las restricciones a tener en cuenta.

- En cuanto a los enlaces entre nodos se propone trabajar con la tecnología WDM y se supone que estos enlaces tienen un comportamiento que en principio no influye sobre el desempeño total de la red. Esta suposición puede ser válida si se cuenta con un diseño del enlace WDM que brinde unas métricas acordes con

cada enlace dentro de la red OBS. Aunque su diseño e implementación no se contemplan en los objetivos de la Tesis, en el Anexo 9 se propone un modelo probado por separado pero que puede servir de soporte ya que se ha obtenido una BER (*Bit Error Rate*) cercana a la ideal. Igualmente, como se ha comentado en otros apartes del presente documento, se ha comprobado la influencia de los efectos lineales y no lineales sobre la infraestructura de red, aunque en los trabajos propuestos en el Capítulo 5 se hacen sugerencias al respecto, este aspecto puntual no se aborda en esta Tesis.

- Finalmente, se reitera que para la realización de cada modelo de red propuesto se define una tabla que resume aspectos como: topología física empleada (por ejemplo NSFNeT), número o cantidad de longitudes de onda por fibra (W = {2, 4, 8, 16}), capacidad en bps de cada enlace (por ejemplo 2,5 y 10 Gbps), tamaño de las colas (y *buffers* puede estar definido por la herramienta elegida – en caso de simulación), velocidades de propagación de los mensajes, velocidad de conmutación de los OXC (algunas veces despreciable), velocidad de procesamiento del BCP (cuando sea necesario), parámetros de QoS (clases y prioridades), si se incluye o no restricción de longitud de onda (*Wavelength Constraint* o *Wavelength Converters*), retardos (valores de *offset* por rangos), tipos de señalización (por ejemplo JET), si incluye o no métodos cognitivos, entre otros.

Los sub puntos 1c y 1d se pueden abordar al final de cada proceso de diseño y simulación y contribuyen a hacer aclaraciones sobre posibles cambios y ajustes requeridos para acotar los modelos de desempeño y simulación.

Fase 2. Selección de métricas, factores y niveles

Cada uno de estos elementos se define sobre cada modelo propuesto. Aunque existen diferentes métricas, en general se adoptan las más empleadas en la literatura para medir el desempeño de una red OBS, se trata de la pérdida de información en la red y la medida de los retardos entre nodos y extremo a extremo. Cada métrica cuenta con valores típicos aceptados para esta clase de redes, se busca observar el comportamiento de los modelos propuestos respecto a escenarios considerados

aceptables, aunque muchas veces no es posible encontrar información[43] al respecto se puede comparar con otro modelo desprovisto de mecanismos cognitivos.

Las medidas a realizar se expresan en gráficas en dos (2) y tres (3) dimensiones, donde se cruzan diferentes variables, por ejemplo, se puede observar la variación de la perdida de información respecto al tiempo de simulación o ante diferentes valores de carga. Igualmente se procede para otras observaciones, cuyas gráficas se cruzan para efectos de comparación. Para las diferentes pruebas tomadas se incluyen gráficas principalmente en dos (2) dimensiones mediante líneas y barras. También si la herramienta lo permite se pueden obtener histogramas de comportamiento.

En la obtención de los datos al terminar los procesos de simulación según las pruebas realizadas para cada modelo, y ante la enorme cantidad de los mismos, es necesario aplicar algunos métodos estadísticos para encontrar el comportamiento y la distribución que pueden representar. En este caso se emplea el estimador de máxima verosimilitud EMV que evidencia consistencia, eficiencia y permite corrección del sesgo.

Fase 3. Modelado y recolección de datos

Este proceso se sigue para cada escenario propuesto. Con estos elementos conceptuales definidos en los capítulos precedentes y las arquitecturas base propuestas, se plantean los modelos de desempeño para lo cual se emplea una metodología de diseño (tomando elementos de la metodología *Top Down*). Una vez se cuenta con el modelo de desempeño, se procede a desarrollar el modelo de simulación, en esta oportunidad se han desarrollado simuladores de redes OBS (y se sugiere uno WROBS) descritos más adelante en este capítulo.

Esta es una fase muy importante en el proceso de elaboración de los modelos ya que un buen diseño conduce a crear un ambiente que se adecue a los requerimientos hechos, las hipótesis propuestas y las preguntas de investigación que puedan surgir.

[43] La mayoría de trabajos o literatura sobre OBS (y en general sobre cualquier tema de investigación) carecen de detalles puntuales sobre realización de pruebas y elementos que se asumen, o metodologías puntuales empleadas, consideradas como reserva.

Fase 4. Selección del ambiente de simulación, Implementación del modelo y verificación.

Se define que el simulador o simuladores de redes OBS a desarrollar y ejecutar están soportados en la plataforma OMNeT++ IDE (*Integrated Development Environment*). En este entorno integrado de desarrollo se construye un modelo de red OBS para los diferentes casos o escenarios de prueba (nodos y topologías), la elección de OMNeT++ se hace inicialmente por sugerencia del grupo de investigación en Comunicaciones Ópticas de la Universidad de Valladolid España (http://www.uva.es/export/sites/uva/) donde se realizó la pasantía internacional, sin embargo, en el Apéndice E se encuentra una comparación entre diferentes herramientas de simulación que fueron analizadas y que respaldan la decisión de haber elegido OMNeT++ y otras que se muestran en seguida.

Complementado la elección realizada y llevando a cabo un análisis aparte sobre la plataforma OMNeT++, ésta muestra sus bondades principalmente en la capacidad que exhibe de permitir la realización de modificaciones en características, protocolos y algoritmos desarrollados debido a que cada componente se puede diseñar, codificar en C++ y realizar las pruebas necesarias, empezando prácticamente de cero. Es decir, la herramienta no cuenta con nodos OBS predefinidos, aspecto que algunos autores consideran ventajoso y otros no tanto.

Muchas veces al contar con módulos predefinidos restringe el acceso a la realización de modificaciones y cambios, lo que muchas veces no permite un acceso completo al código de los mismos. En esta ocasión como se requiere introducir métodos cognitivos se considera que esta característica de OMNeT++ es un aspecto favorable que permite que comenzar con el diseño de los módulos simples, se agregan otros módulos simples para construir módulos complejos, los cuales se van probando para garantizar que lo desarrollado hasta el momento funciona adecuadamente y que se puede ir realizando la integración de módulos hasta completar la red OBS.

Para un mejor entendimiento de OMNeT++ se ha elaborado el Apéndice F en la sección F1 donde se encuentra una descripción con más detalle de la herramienta, igualmente para los interesados en la versión académica se recomienda visitar el

sitio Web http://www.omnetpp.org. La tabla 4.1 siguiente resume aspectos relevantes de las diferentes herramientas analizadas.

Herramientas de Simulación	Flexibilidad	Implementación de meta heurísticas	Implementación de Cognición	Licencia
NS-2	Baja	No Permite	No Permite	No Requiere
NS-3	Baja	No Permite	No Permite	No Requiere
OPNET	Media	No Permite	No Permite	Requiere
NetSim	Media	No Permite	No Permite	Requiere
OMNeT++	Alta	Permite	Permite	No Requiere

Tabla 4. 1. Requerimientos analizados sobre las herramientas de simulación

Algunos autores pueden considerar que la construcción de la totalidad de la red en OBS puede convertirse en un proceso complejo de programación en C++ y NED. Aspecto que puede llegar a ser cierto si no se cuenta con conocimientos en Programación Orientada a Objetos u OOP (*Object Oriented Progamming*) y C++ principalmente.

Otro aspecto de relevancia de la herramienta la constituyen las interfaces gráficas de usuario las cuales permiten observar en tiempo de simulación los procesos animados de la simulación, la ocurrencia de los eventos y obtención de algunos resultados.

Finalmente, se recuerda que la licencia académica de OMNeT++ es gratuita y estable en entornos Linux (diferentes versiones) y en entornos Windows™, en este último se han hecho la mayoría de pruebas lo que contribuye a evaluar la estabilidad de la herramienta para las versiones sobre Windows 7, Windows 8 y 8.1. En el Capítulo 5 se hace un comentario sobre algunos hallazgos hechos sobre las versiones para Windows.

Para obtener los modelos completos sobre las redes OBS se diseñan y prueban los módulos a partir de sub módulos internos y luego se procede a construir un Nodo de Borde completo (*edgeNode*), luego este nodo se prueba por separado entre una fuente de datos y un módulo de recepción, de esta forma se afina (*tunning*) su operación. Igualmente se procede con el Nodo Central (*coreNode*). Finalmente como se trabaja sobre topologías de redes predefinidas donde un nodo puede estar

ubicado en alguna ciudad (o región geográfica), se sugiere trabajar con nodos mixtos (*mixedNode*) que realicen en conjunto las funciones de ingreso, egreso, enrutamiento y conmutación (*mixedNode* = (*edgeNode, coreNode*)). Finalmente, en el Apéndice F en la sección F.2 se encuentra el proceso de obtención del simulador OBS en OMNeT++ que se utilizó en las pruebas.

Fase 5. Validación y análisis

La validación asegura que el modelo de desempeño es una representación correcta del sistema con respecto a las métricas, factores y niveles seleccionados. Este proceso se puede llevar a cabo comparando las salidas obtenidas del modelo de desempeño con un sistema real. Sin embargo, muchas veces no se cuenta con el sistema real, en estos casos se debe contrastar con otros resultados o resultados de modelos analíticos. Después que el modelo ha sido validado, se hace un análisis de los factores que tienen un mayor impacto sobre el desempeño del sistema (aunque no siempre es necesario). Al igual que como se ha expresado para los demás pasos, este se realiza para cada escenario de simulación.

Fase 6. Experimentación, análisis y presentación

En este paso, se ejecutan las diferentes simulaciones para lo cual se siguen los pasos propuestos en la metodología de simulación de sistemas de telecomunicaciones, se recolectan los datos, se analizan y finalmente se representan gráficamente. Para la generación de datos con mayor confiabilidad se acude a la teoría de la estimación la cual permite proporcionar un valor aproximado a un parámetro o variable a partir de datos empíricos o medidas. La representación gráfica se realiza con la ayuda de la hoja de cálculo Excel™ y Matlab™ principalmente.

Con estos elementos, se procede a construir los modelos de red necesarios para realizar los diferentes escenarios de prueba, se comienza con un diseño de red inicial o diseño de partida, se proponen los modelos a implementar, se diseñan los nodos de la red acorde con los trabajos empleados como elemento comparativo (se deben considerar las topologías de las redes y los parámetros que permitan crear entornos

de comparación), para esto se emplea la adaptación de la metodología *top down* para el diseño de redes que se encuentra en el Apéndice H y el Anexo 5.

4.2.3. Diseño de la red Inicial (de Partida)

Las redes OBS, como se espera, deben soportar toda clase de tráfico multimedia proveniente principalmente de clientes IP, ya que en un futuro se espera que esta tecnología pueda ser el soporte ideal para Internet como red global de información y la inclusión de la denominada Internet de las cosas, así que un escenario como el mostrado en la figura 4.3 es muy viable.

Para hacer realidad este escenario se ha requerido de la realización de laboratorios de prueba (*test beds*) y procesos de investigación constantes sobre redes ópticas OBS en diferentes lugares del planeta.

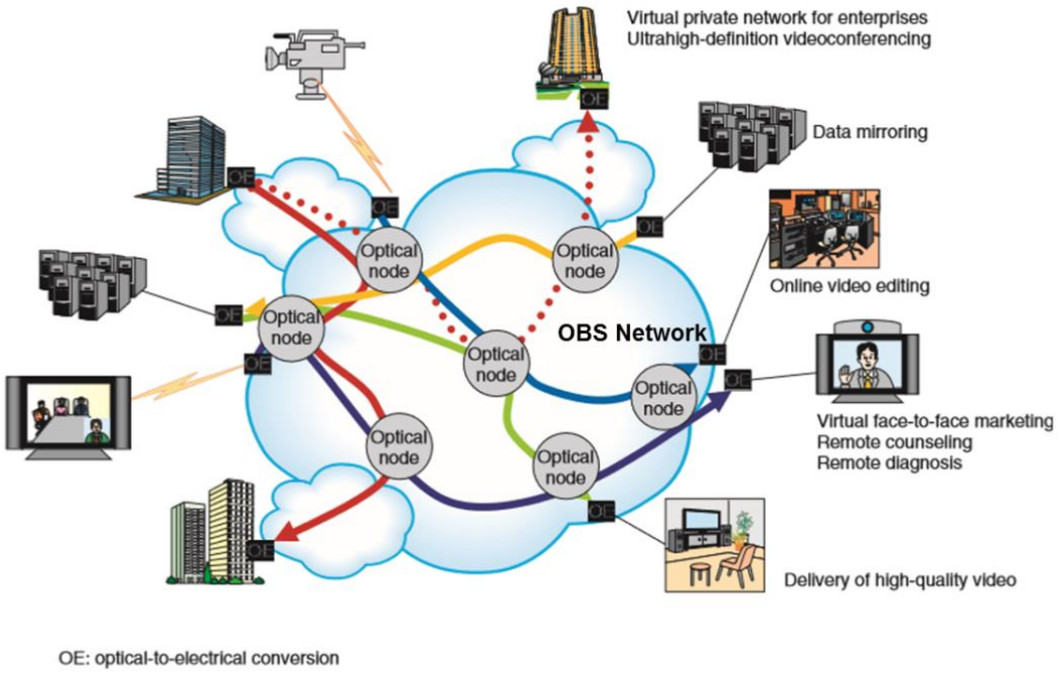


Figura 4.3. Escenario multimedia sobre OBS

Para el desarrollo de esta Tesis se comienza con un modelo genérico de una red OBS WAN con enfoque distribuido como se muestra en la figura 4.4, acorde con el modelo genérico la red OBS del Capítulo 1 (figura 1.1) se compone de un área de

acceso donde se encuentran los nodos de borde (*edge Nodes*), un núcleo que contiene los nodos centrales (*core Nodes*), una serie de clientes IP, enlaces de acceso de los clientes IP a los nodos de borde, estos enlaces pueden ser usando medios metálicos (como par trenzado por ejemplo), los enlaces por fibra óptica que conectan los nodos de borde con los nodo centrales mediante y los nodos centrales entre sí están emplean la tecnología WDM.

Para lograr un diseño viable de la red OBS WAN se recomienda usar en lo posible una metodología de diseño de redes que a través de una serie de pasos permita obtener un modelo de red que se acerque al cumplimiento de las expectativas. En la literatura sobre redes OBS la mayoría de veces se asume un modelo de red que posteriormente es utilizada para la realización de las pruebas, para esta ocasión como se había anotado en un principio se toman algunos elementos metodológicos de la metodología para el diseño de redes *Top Down* que permiten de una forma algorítmica obtener un modelo de OBS que pueda convertirse en el modelo de desempeño y posteriormente en el modelo de simulación.

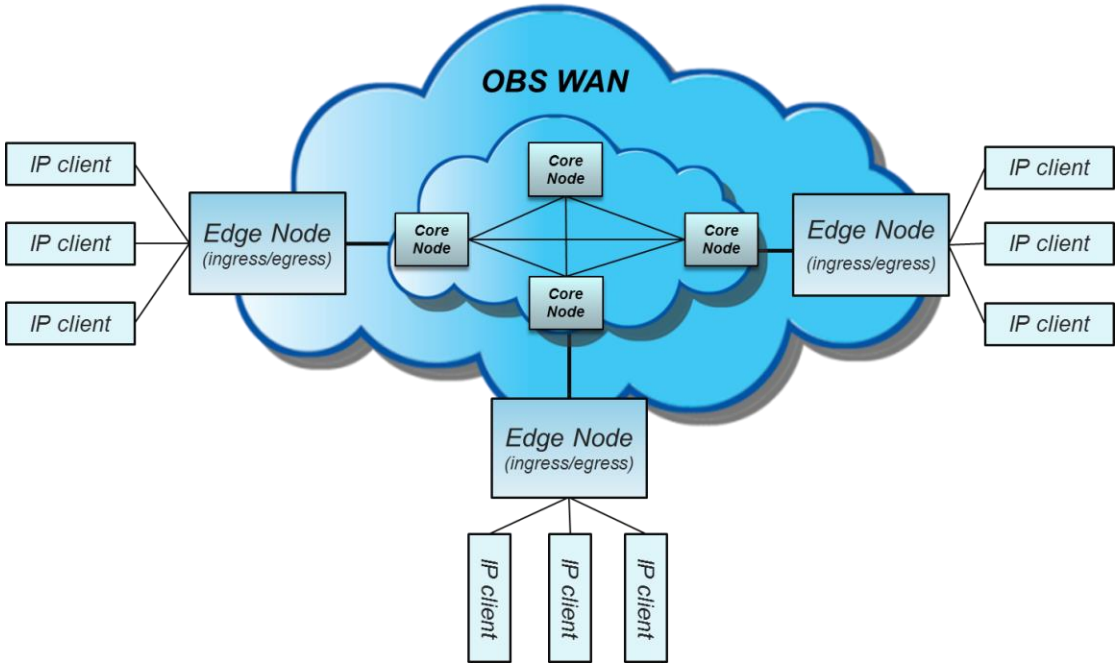


Figura 4. 4. Modelo inicial de una red WAN OBS

En resumen lo que se busca con la adaptación de esta metodología de diseño es contribuir a que este paso dentro de los diferentes modelos de simulación que se

proponen se convierta en un aspecto más formal y adaptado a procesos reales de diseño de redes.

Los elementos tomados de la metodología (Oppenheimer 2010) están incluidos en el denominado Ciclo de Diseño que se muestra en la figura 4.5 (Apéndice H), este ciclo está compuesto por dos (2) etapas, las etapas de diseño y etapas de implementación distribuidas de la siguiente forma:

Etapas de diseño:

- Análisis de requerimientos.
- Desarrollo del diseño lógico.
- Desarrollo del diseño físico.
- Pruebas, optimización y documentación del diseño.

Etapas de Implementación:

- Implementación y pruebas de red.
- Monitoreo y optimización del desempeño de red.

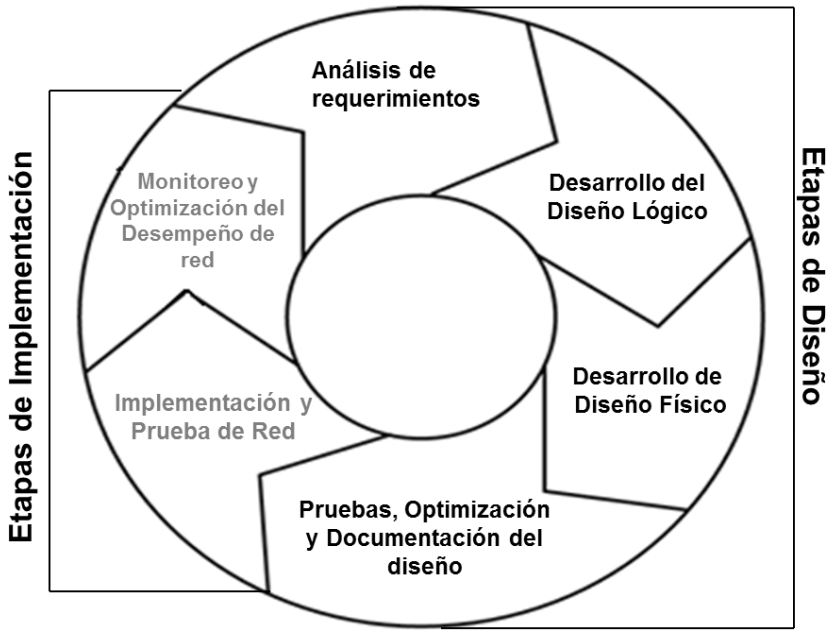


Figura 4.5. Ciclo de diseño de redes *top-down* (Oppenheimer 2009)

Como se observa, para esta ocasión se toman únicamente las etapas de diseño definido por cuatro (4) etapas. No se incluyen las etapas de implementación debido a que esta red no será implantada físicamente. Igualmente, se observa como la fase de pruebas, optimización y documentación del diseño están cubiertas por las fases 4, 5 y 6 de la metodología general que se acogió para el desarrollo de este capítulo y que se encuentra en la figura 4.1, por lo tanto esta etapa no se desarrolla, en su lugar se continua con las fases 4,5 y 6 antes mencionadas.

4.2.4. Desarrollo de la metodología para el diseño de redes

Con la definición de elementos en la sección anterior, se procede al desarrollo de las diferentes etapas que forman parte del proceso de diseño de las redes OBS que serán fundamentales para los modelos de simulación.

4.2.4.1. Análisis de requerimientos

Consiste en analizar las metas (*goals*) técnicas y de negocios, la caracterización de la red existente (si existe alguna) para su actualización y la caracterización del tráfico de la red.

Las metas técnicas típicamente incluyen: escalabilidad, disponibilidad, desempeño de la red, seguridad, gestión, adaptabilidad y que tan asequible es la red. En seguida se desarrollan cada una de ellas.

De acuerdo con el modelo de la figura 4.4 se trata de una red WAN con tecnología por conmutación óptica de ráfagas OBS que cubre diferentes territorios Norte América, Europa y Gran Bretaña. Esta selección se hace teniendo en cuenta que los escenarios típicos para realizar pruebas sobre redes OBS (y otras tecnologías en estado de investigación) se concentran en redes tipo WAN desplegadas sobre estos países y regiones geográficas.

Escalabilidad: teóricamente se proponte que tecnológicamente la red OBS puede expandirse hasta escenarios *Long Haul* sin tener problemas. Como se ha dicho anteriormente, se trata de una red WAN. El diseño de los nodos de la red pueden replicarse casi sobre cualquier territorio y los componentes de red ROADM, OXC,

componentes de los enlaces WDM pueden extenderse por muchos kilómetros (en particular sobre DWDM). Para el caso de las redes WROBS con control centralizado su cobertura y escalabilidad pueden estar restringidas debido a su funcionalidad ya que un mayor número de nodos implica mayor congestión en el nodo o servidor central.

Disponibilidad: para una operación de la red (una vez implementada) 7/24 se requiere una disponibilidad de 99.999% (los cinco nueves), es un parámetro complejo de cumplir ya que muchas veces se exige sin analizar que los procesos de actualización se deben hacer con la red funcionando. La disponibilidad (A) de una red se mide comúnmente según la ecuación 4.1.

$$A = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (4.1)$$

La ecuación incluye el tiempo medio entre fallas MTBF (*Mean Time Between Failures*) o MTBSO y el tiempo medio para su reparación MTTR (*Mean Time To Repair*) o MTTSR.

Desempeño de la red: se mide principalmente mediante parámetros como ancho de banda (capacidad), utilización, *throughput*, carga ofrecida, precisión (trafico transmitido correctamente respecto al tráfico total enviado), retardos, variación del retardo, pérdida de información (medidas de pérdida de ráfagas). Este último aspecto se mide mediante la probabilidad de pérdida de ráfagas que para las redes OBS se sitúa en el rango de 10^{-3} a 10^{-6}.

- **Medida del *throughput***

Los factores que limitan el *throughput* tienen que ver con las tasas de errores extremo a extremo, tamaño de las ráfagas, tiempos de retransmisión si aplica, eficiencia en el uso del ancho de banda, la figura 4.6 muestra como las ráfagas hacen más eficiente el uso del ancho de banda, se recuerda que este es uno de los aspectos que han hecho de OBS una de las mejores opciones en redes ópticas para soporte de Internet.

Igualmente, el tamaño de las colas influyen en el uso del ancho de banda, la figura 4.7 muestra una gráfica que permite revisar como el promedio de utilización del ancho de banda normalizado respecto al tamaño o profundidad de las colas. Como se observa en la gráfica no se puede abusar del empleo de colas ya que pueden ser responsables de la utilización del ancho de banda disponible.

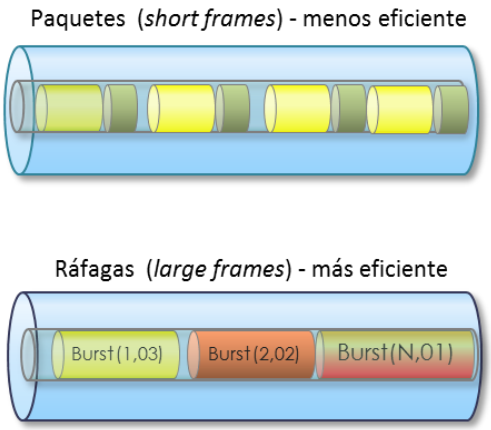


Figura 4.6. Eficiencia en el uso del ancho de banda por PDU grandes y pequeñas

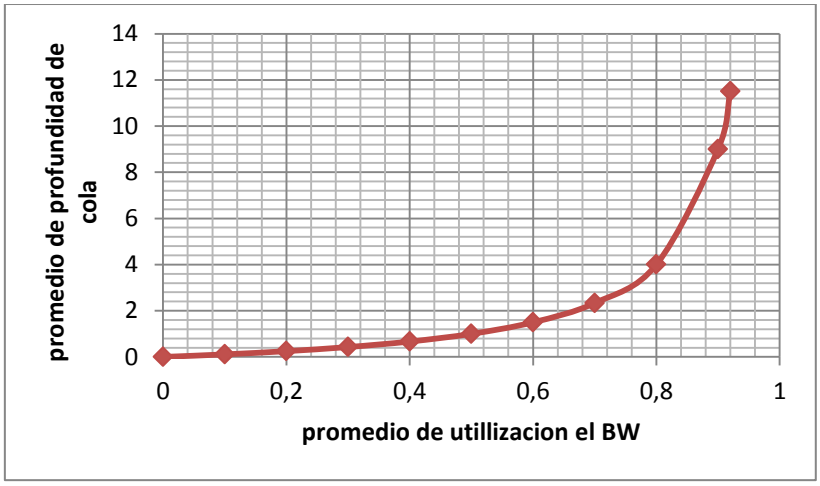


Figura 4.7. Profundidad de la cola vs utilización del BW (gráfica del autor)

En una red OBS se requiere de almacenamiento (colas) en los nodos de borde y en los nodos centrales, en los primeros se usan para la construcción (ensamble) de las ráfagas y eventualmente cuando se tiene como una cola de ráfagas en su planeación. Estas colas se distribuyen por dirección de destino y clases de servicio. En los nodos centrales las colas se emplean para almacenar el BCP antes de ser

atendido. Por su parte en las redes WROBS por usar un modelo centralizado, las colas se emplean en los nodos de borde y en el nodo servidor o central para atender los requerimientos de recursos provenientes de los nodos de la red.

Respecto al parámetro de carga ofrecida, es importante anotar que la medida del tráfico se hace en Erlangs y el proceso de medida y utilización de la carga ofrecida (*offered load*) como uno de los parámetros más importantes que se emplean para realizar medidas y presentar resultados de simulación. La ecuación 4.2 muestra la formula típica de Erlang B para el cálculo de la probabilidad de rechazo al requerir un servicio y que no haya recursos n disponibles.

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

- **Carga ofrecida versus carga efectiva**

La capacidad de cualquier red de datos puede ser definida como la cantidad de tráfico que puede ser transferida a través de ella en una unidad de tiempo. Para una red con enlaces bidireccionales con capacidad de 10Gbps, la capacidad de la red será de 80Gbps. De otro lado, la carga de tráfico de la red es la cantidad de tráfico que los usuarios generan e intentan transferir a través de la red produciendo cierta cantidad de eventos de transmisión de datos, lo cual requiere asignación de recursos.

La carga ofrecida a la red se define en forma directa como la relación entre la carga de tráfico de red total y la capacidad de la red, como se muestra en la ecuación 4.3. Como puede inferirse, la carga ofrecida a la red puede ser mayor que 1, esto indica que los usuarios podrían ofrecer más carga que la que puede soportar la red.

Además, esta medida describe muy bien la condición de la red, ya que en condiciones de carga ligera o moderada (donde todo o casi todo el tráfico generado puede ser transportado sin imponer pérdida de paquetes) podría tener un valor menor que 1, si hay sobre carga en la red (*over flow*), esto puede ocurrir cuando los usuarios pueden transmitir más datos de los que puede aceptar una estructura de red dada en una unidad de tiempo, la carga ofrecida puede ser mayor que 1.

La carga efectiva de red se define como la relación entre el tráfico transportado (*carried traffic*) y la capacidad de la red, como se expresa en la ecuación 4.4.

$$L_{offered} = \frac{\sum_{i=1}^{n} L_i}{\sum_{j=1}^{m} C_j} \quad (4.3)$$

$$L_{effective} = \frac{\sum_{i=1}^{n} M_i}{\sum_{j=1}^{m} C_j} \quad (4.4)$$

En estas ecuaciones:

- $L_{offered}$ es la carga ofrecida a la red.
- $L_{effective}$ es la carga efectiva de red.
- L_i es la cantidad de tráfico generado por un solo usuario i (fuera de n) es una unidad de tiempo.
- C_j es la capacidad de un solo enlace j (fuera de n) en la red (por simplicidad se asume que todos los enlaces tienen la misma capacidad).
- M_i es la cantidad de tráfico transportado por un enlace i.
- n es el número de usuarios activos en la red (produciendo tráfico).
- m es el número de enlaces en la red.

Para el caso de los retardos en las redes OBS estos se analizaron con mayor detalle en el Capítulo 2, como resumen se muestra la ecuación 4.5 para el cálculo general del retardo extremo a extremo. La cual coincide con la ecuación 2.6. Igualmente, la ecuación 4.6 muestra el cálculo del retardo teniendo en cuenta los retardos de ensamble.

$$D_{end\ to\ end} = N * \left(D_{tx} + D_{prop} + D_{proc} + D_{queue}\right) \ (4.5)$$

$$D_{end\ to\ end} = D_{ensamble} + D_{prop} + \sum_{i=1}^{N(hops)} \left(D_{proc} + D_{oxc}\right) \ (4.6)$$

Cuando se emplean clases de servicio y si n es el número de las diferentes clases de servicio existentes y no relacionadas entre sí, entonces el retardo máximo experimentado por el tráfico de clase alta será la suma de $T_{min} + TS_{max} * n + Retardo\ de\ propagación.$

Respuesta en tiempo: como responde la red, existe un límite de los 100ms a partir de los cuales los usuarios detectan problemas en los servicios prestados, igualmente, este umbral se toma como base para muchas implementaciones de TCP retransmiten datos sobre los cuales no se ha recibido un ACK. Se espera que las redes OBS puedan satisfacer este aspecto.

Los demás aspectos que se tienen en cuenta en esta fase de análisis de requerimiento son Seguridad y Gestión principalmente, sobre el primer aspecto se espera que la red sea segura, al igual que muchos de los tópicos de investigación sobre redes OBS, los aspectos relacionados con seguridad en redes OBS no ha tenido la atención requerida, algunos autores proponen cifrar las ráfagas antes de enviarlas por la red. Otros proponen incluir formas de protección a las señales ópticas para evitar que otras señales provenientes de cualquier fuente laser puedan interferir con portadoras ópticas de una red OBS particular. Sobre gestión de redes OBS existen diferentes propuestas de contar con un plano de gestión el cual para su operación se puede basar en modelos para monitoreo de desempeño óptico OPM (*Optical Performance Monitoring*) particularmente en los enlaces DWDM. En general no se cuenta con un sistema de gestión para OBS se pueden adaptar sistemas basados en gestión OSI e IETF. Para finalizar esta sección, la tabla 4.2 muestra hasta el momento las características de la red OBS.

Característica	**Definición**
Tipo de red	OBS con nodos distribuidos.
Cobertura o extensión	WAN
Tipos de nodos	Nodos de borde o frontera y nodos centrales. Nodos mixtos según se requiera.
Calidad de Servicio	Implementación de Clases de Servicios y prioridades
Métricas	Probabilidad de perdida de ráfagas (10^{-3} a 10^{-6}) Retardos extremo a extremo (*delay*), considerando retardos mínimos por propagación de señales. Desempeño para diferentes valores de *offset*. Desempeño para diferente número de longitudes de onda.
Restricciones	No emplear convertidores de longitudes de onda así que se cuenta con *transceivers* antes que *transponders*. Por lo anterior se maneja restricción en la longitud de onda. No se emplean FDL.

Tabla 4.2. Resumen inicial de características de la red OBS

4.2.4.2. Diseño del Modelo Lógico de la red OBS inicial

Según la metodología *top down*, el siguiente paso en el proceso corresponde al diseño del modelo lógico, este modelo generalmente se representa por medio de un grafo de Euler $\boldsymbol{G} = (N, A)$, este aspecto es importante para la selección de longitudes de onda ya que permite emplear la técnica de coloreado de grafos, además de definir los siguientes aspectos:

- Diseño de la topología de red.
- Modelo de direccionamiento y nombramiento.
- Protocolos de enrutamiento y conmutación.
- Modelo de seguridad.

- **Diseño de la Topología de red**

Una forma de decidir cuál topología emplear debe tener en cuenta el escenario o entorno donde se piensa ubicar la red, ya sea que se requiera diseñar e implementar una red PAN, LAN, MAN o WAN un aspecto definitivo a considerar es definir la topología de la red. Entendiendo la topología como un mapa que muestra la interconexión de red indicando nodos, puntos de interconexión, enlaces y comunidades de usuarios y sitios geográficos. En general se cuenta con dos (2) clases de topologías desde el punto de vista del control, se trata de las topologías jerárquicas y topologías planas (*flat*), las primeras dependen de una raíz o nodo principal que controla la operación de la red, la segunda tiene un carácter más distribuido y se sugiere usarla en redes tipo WAN. Igualmente, las topologías pueden ser regulares o irregulares dependiendo de la distribución y el parecido con formas conocidas (ejemplo de topologías regulares: estrella, malla, anillo, bus, árbol), igualmente, en la mayoría de las topologías seleccionadas el excepto en la primera, los nodos no tienen conexión en malla completa (*full mesh*).

Debido a las características del presente trabajo, se han elegido diferentes topologías que forman parte del contexto de las redes WAN y sobre ellas se trabaja. La tabla 4.3a) muestra un resumen de las topologías de redes a emplear y sus características más relevantes. Estas topologías se ubican en la tabla en el orden en que se emplean para las pruebas.

	Re de Prueba TEST	NSFNeT	EON	GEANT2
Cobertura geográfica	Colombia	Estados Unidos de NA	Europa	Europa
Topología	Regular *Full mesh*	Irregular	Irregular	Irregular
Número de nodos	4	14	26 (19)	32
Número de enlaces (bidireccionales)	6	21	51(37)	52
Tipo de nodos	Mixtos	Mixtos	Mixtos	Mixtos
Promedio de grado de enlace	6/4=1.5	21/14=1.5	51/26=1.96	52/32=1.62
Promedio de longitud de enlaces (km)	300	1086	742 (753)	661.45

Tabla 4.3a). Información sobre las topologías seleccionadas

Los nodos mixtos también suelen llamarse nodos compuestos (*edgeCore*) ya que componen un nodo de borde o frontera con un nodo central. Esto se justifica ya que por ciudad se coloca un solo nodo el cual recibe y entrega tráfico local (ingreso y egreso) y además sirve de nodo de tránsito para ráfagas que tengan un destino diferente (nodo central).

Con estos datos se procede a realizar las gráficas correspondientes a las topologías mencionadas.

- **Red de prueba TEST**: se supone que esta red toma el *backbone* de la antigua red de Telecom Colombia (ahora Movistar) conecta las ciudades de Santiago de Cali, Santafé de Bogotá, Medellín y Barranquilla, es una red con topología de malla completamente conectada (*full mesh*). La figura 4.8 muestra la topología de red.

  Esta red se emplea para realizar las pruebas iniciales conforme se van diseñando los nodos compuestos. Sus mismas características permiten la realización gradual de pruebas y ajustes para determinar si la red OBS está operando (se está comportando) acorde con su funcionalidad.

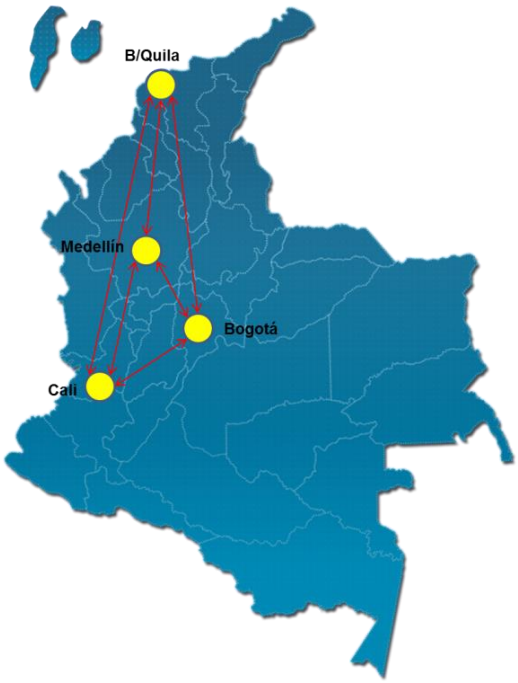


Figura 4.8. Topología y distribución geográfica de la red de pruebas TEST

- **Red NSFNeT (***National Science Foundation Network***)**: es una red WAN que conecta 14 ciudades de los estados unidos de norte américa. La figura 4.9 muestra la topología de red. Esta red es de gran importancia ya que la mayoría de pruebas se lleva a cabo sobre esta topología. Igualmente, es una de las topologías de red más empleadas para análisis de desempeño de redes en muchos trabajos de investigación. Esta red posee una topología distribuida irregular con su número de conexiones variables por nodo.

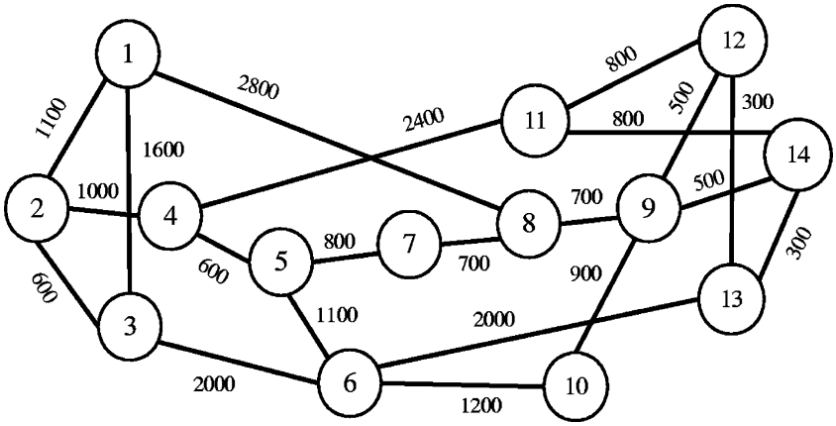


Figura 4.9. Topología de red NSFNeT

- **EON (***European Optical Nework***)**: esta red corresponde al proyecto Pan Europeo que incluye a la mayoría de países europeos, presenta diferentes versiones, en la figura 4.10 su cobertura va más allá de la Gran Bretaña. Al igual que la anterior red tiene una topología distribuida irregular.

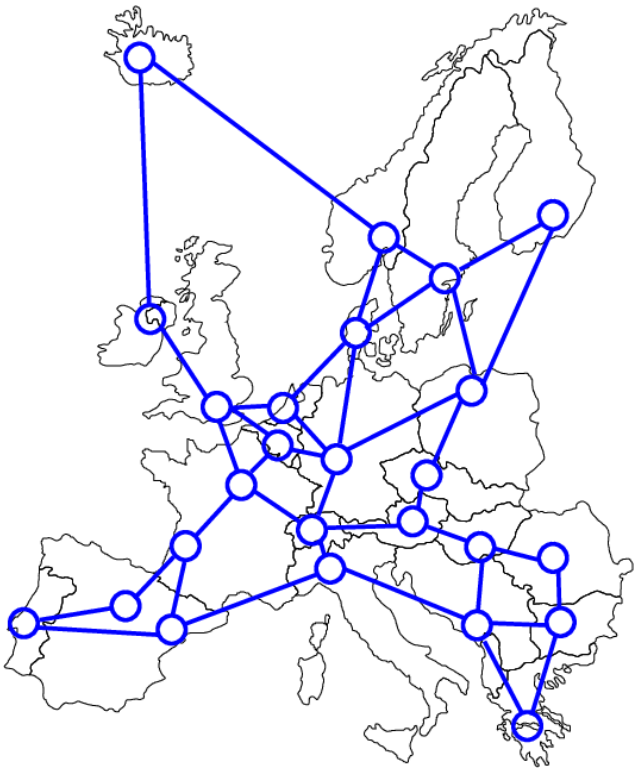


Figura 4.10. Topología de red EON

- Esta topología se selecciona por su cantidad de nodos y enlaces que supera las anteriores. Corresponde a una red con topología irregular de área extensa multiservicios y de banda ancha.

- **GEANT 2 (***National Research and Education Network***)**: como se muestra en la figura 4.11 corresponde a una red de banda ancha europea construida para la comunidad educativa (estudiantes e investigadores) su distribución es multidominio y se considera el corazón de la interconexión global de redes de investigación en Europa.

Esta red tiene un enfoque distribuido y se selecciona por contar con un mayor número de nodos y enlaces, corresponde a una red con topología irregular de área extensa.

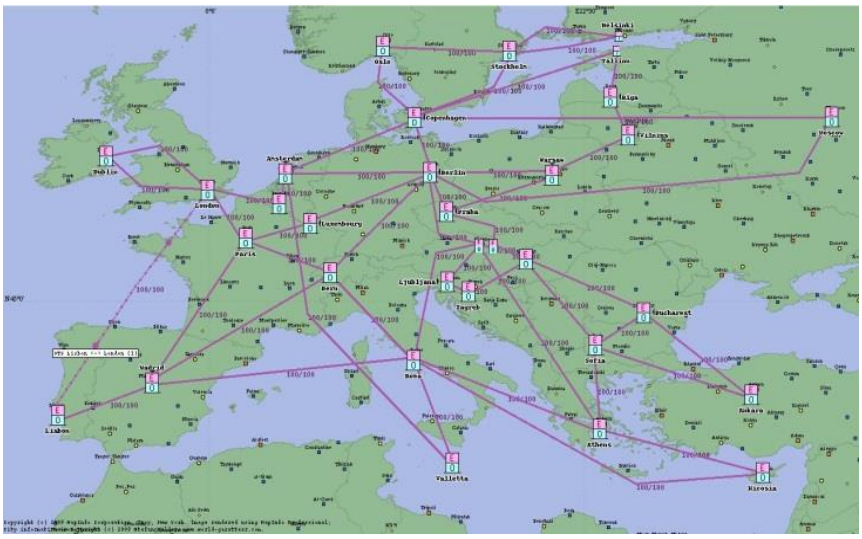


Figura 4.11. Topología de red GEANT 2

Sobre estas topologías se harán las diferentes pruebas y diseños en los respectivos simuladores construidos en OMNeT++.

Para completar la fase de diseño del modelo lógico, se deben incluir los aspectos de Modelo de direccionamiento y nombramiento, definición de los Protocolos de enrutamiento y conmutación y los modelos de seguridad.

- **Modelo de direccionamiento y nombramiento**: por tratarse de redes de prueba, las direcciones asignadas corresponden a los diferentes nodos que conforman la red, no se definen nombres de dominios en su caso se puede identificar cada instancia de la red de prueba con formato Nombre de red y digito que indica modelo de prueba. Al momento de asignar las direcciones de los nodos de destino se hacen según la ubicación de los nodos dados al momento de la definición del modelo de simulación. Sin embargo se espera que en condiciones reales se deba manejar el formato de direccionamiento que se asigne en su implementación. Igualmente, si se soportan paquetes IP estos pueden ir marcados con direcciones IP de destino y se sugiere aplicar procesos de resolución de direcciones IP-OBS y OBS-IP respectivamente.

Los formatos de dirección tienen la forma:

- Dirección de nodo: $nodeAddress_i$ (ej: NSFNeT i=1,.., 14)
- Dirección de nodo de destino: $destAddr_i$ (ej: NSFNeT i=1,.., 14)

Los formatos de nombramiento pueden ser:

- Configuración de prueba i: (ej: NSFNeT_i, GEANT_i).

- **Protocolos de Conmutación y Enrutamiento**:

Los protocolos obedecen a las características propias de las redes OBS explicadas en los Capítulos 1 y 2 y en el Apéndice H y Anexo 11.

- Protocolo de enrutamiento y asignación de longitud de onda: RWA. Este puede ser estático y dinámico. El protocolo general utilizado es el *shortest path first fit.*

- Protocolo de conmutación: Conmutación óptica de ráfagas y de tipo espacial según la configuración que resulta de interpretar el BCP. Proceso realizado en el plano de datos para el caso de las ráfagas de datos DB se realiza en el dominio completamente óptico, previo establecimiento de la ruta.

- **Modelo de seguridad**: no se define un modelo de seguridad específico pero se sugiere la posibilidad de implementar mecanismo de protección de la información mediante *data encryption* aplicado a las ráfagas de datos DB y seguridad a nivel físico (*physical security*).

4.2.4.3. Diseño del Modelo Físico de la red OBS inicial

Esta etapa de diseño comienza seleccionando las tecnologías para redes WAN disponibles, existen diferentes opciones como SONET, SDH, Metro (en acceso WAN) y *Carrier* (Transporte WAN) Ethernet, ATM, *Frame Relay*, MPLS principalmente, unas tecnologías con mayor aceptación que otras. En esta ocasión la tecnología seleccionada es OBS sobre la cual se procede a realizar el diseño del modelo físico.

Esta etapa de diseño se aprovecha para realizar un **diseño orientado a nodos**, se procede a diseñar completamente un nodo de la red y en seguida se instancia el nodo las veces que se requiera según la topología de red a evaluar. De esta forma es posible conocer cómo se estructura cada nodo en su composición interna, sus elementos funcionales y la ubicación de los métodos cognitivos cuando se requiera.

Al diseñar un modelo de red con nodos compuestos, estos actúan como nodos de acceso a la red WAN OBS en cada ciudad donde se ubique uno de ellos, de esta manera se provee el acceso a la red WAN OBS denominado WAN *edge*.

- **Selección de las tecnologías del enlace entre nodos**

Las conexiones entre nodos de las redes WAN pueden ser inalámbricas fijas o móviles (satelital LEO, de lograr implementarse), satelitales GEO y radio enlaces terrestres por microondas principalmente. Igualmente se cuenta con enlaces por fibra óptica con y sin granularidad. Para las redes OBS de prueba se considera que cada red de las topologías obtenidas cuentan con el despliegue de enlaces WDM entre un par de nodos, cuya configuración para la variante DWDM se muestra en la figura 4.12.

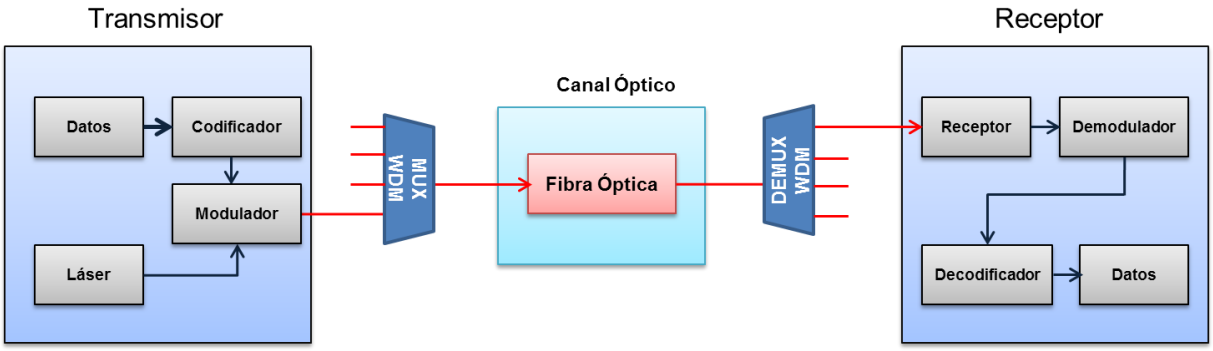


Figura 4.12. Sistema de Comunicaciones ópticas basado en WDM

El nivel físico de la red OBS estará conformado por nodos OXC y enlaces cuyos elementos principales son:

Transmisor: fuente de datos, codificador y selección del formato de modulación, modulador (ej: Mach Zender) y fuente LASER (puede ser de onda continua CW).

Enlace: multiplexores y demultiplexores, fibra óptica, amplificadores, 3R. Efectos lineales y no lineales. Aunque no se hace un análisis exhaustivo de esta clase de enlaces, se busca que pueda tener un diseño casi ideal para que su funcionamiento no afecte los demás componentes y niveles superiores de la red OBS. Aunque algunos autores consideran que el nivel físico es transparente, ya se han realizado estudios que demuestran la incidencia que tienen los Efectos Lineales y no lineales sobre el desempeño de las redes ópticas y OBS no está exenta de ser afectada.

Receptor: conversores O/E demodulador, decodificador.

Un elemento esencial es el conmutador óptico el cual se propone se de la tecnología OSF (*Optical Fabric Switch*) como el mostrado en la figura 4.13. Una mejor descripción de los mismos se encuentra en el Apéndice C y en Vlachos & Monoyios (2009).

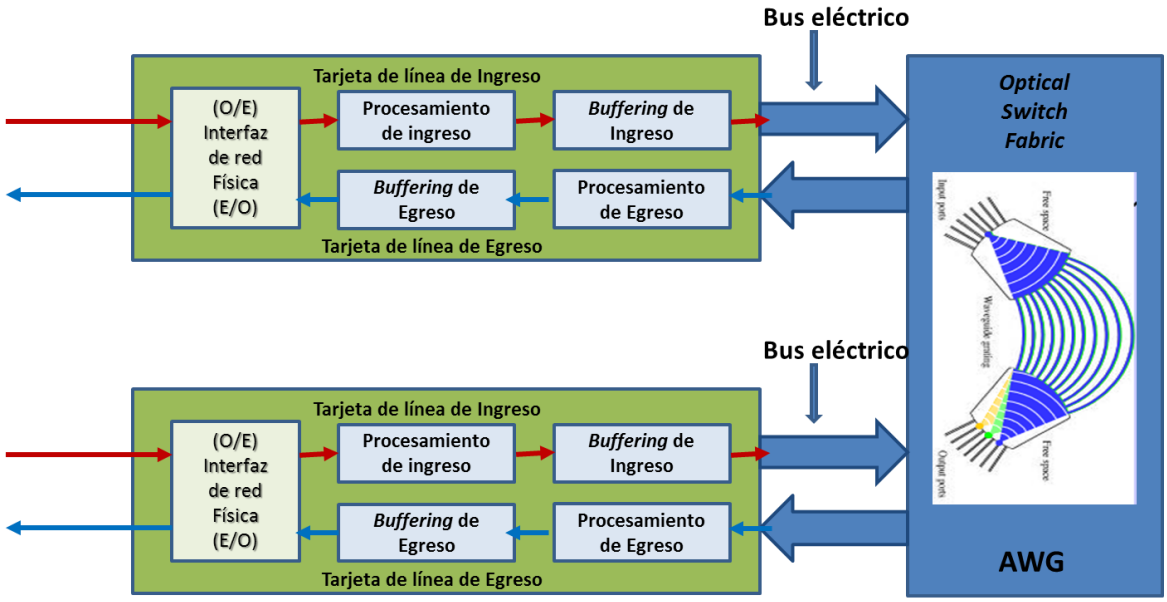


Figura 4.13. Modelo en bloques de un OSF

- **Diseño orientado a nodo:** como se recuerda, se trata de primero diseñar los nodos y luego obtener instancias del mismo para conformar la totalidad de la red.

  - **Nodo de frontera o borde (*edgeNode*),** la figura 4.14 recrea la funcionalidad del nodo de borde según el modelo funcional mostrado en la figura 4.2.

En su operación funcional, los nodos constan de una serie de sub módulos que realizan las diferentes tareas, desde realizar la clasificación (*classifier*) de los paquetes IP que ingresan por sus interfaces, esta clasificación se realiza primero por dirección de destino DBQ (*Destination Based Queuing*) y posteriormente por clase de servicio (que puede identificar a servicios como voz, datos y video), de existir prioridades para los paquetes o ráfagas estas se incluyen o interpretan en este módulo, en seguida se procede a planificar pasando por el proceso de ensamble de las ráfagas (*burstifier*) por tiempo T, también por umbral de ráfaga con valor B y mixto, según el umbral alcanzado primero.

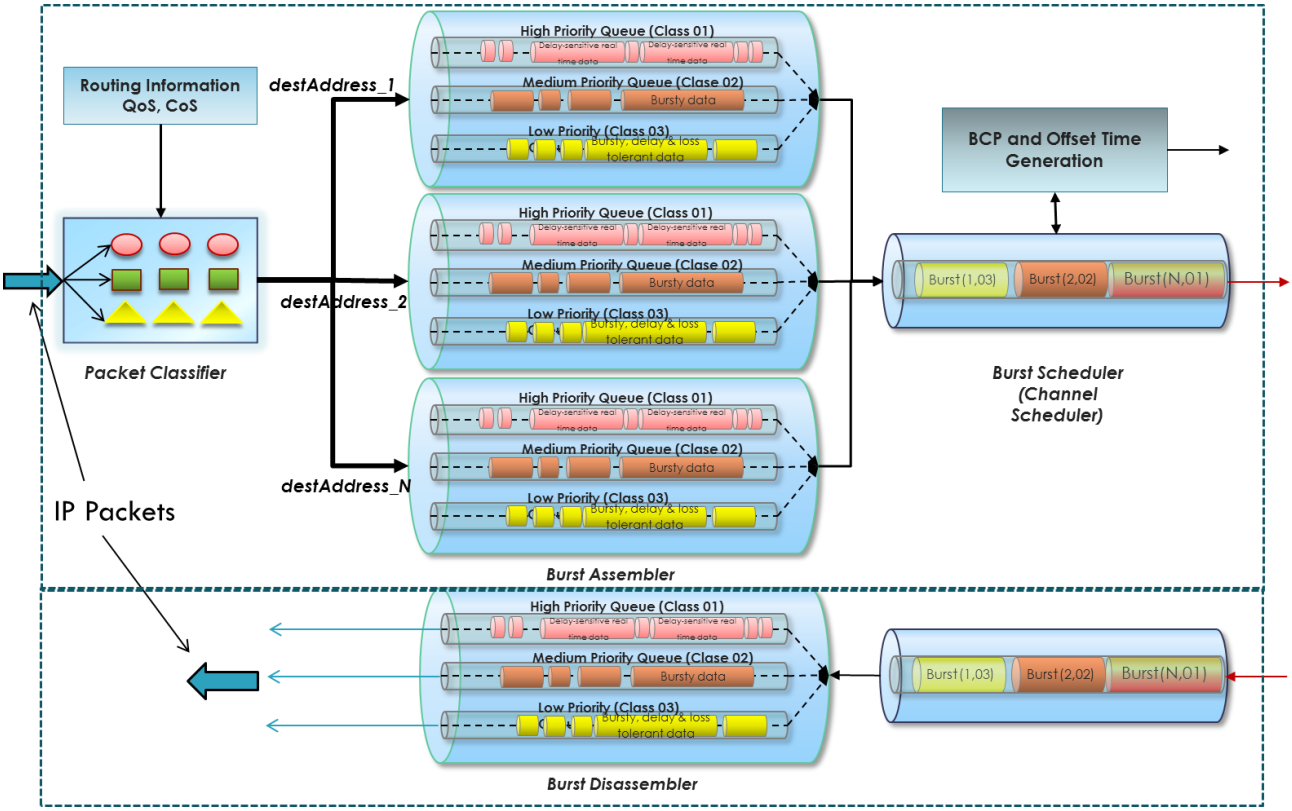


Figura 4.14. Modelo del nodo de borde o frontera (*edgeNode – ingress/eggress*)

- Posteriormente se procede a encontrar la ruta para la ráfaga, se configura el BCP y se envía la ráfaga hacia el nodo central. La elección de los valores de *offset*, longitudes de onda, longitud o duración de la ráfaga, al igual que el método de señalización forman parte de este nodo en su módulo de transmisión, complementando su parte de recepción se cuenta con un módulo receptor compuesto por un desensamblador de ráfagas en paquetes IP e

igualmente se definen sub módulos funcionales para recolección de datos y generación de estadísticas.

-

En el caso de incluir elementos cognitivos como los diferente métodos que actúan sobre los procesos de enrutamiento y asignación de longitudes de onda, así como sobre los procesos de ensamble de ráfagas, estos se ubican funcionalmente como se muestra en la figura 4.15. Los parámetros completos para su operación y su funcionalidad se describen con mayor detalle en la sección sobre elaboración del modelo de simulación, en conjunto con el Apéndice F que describe la elaboración del simulador en OMNeT++.

- **Nodo central o de núcleo (*coreNode*),** al igual que para el nodo de frontera, se toma la funcionalidad que para estos nodos se muestra en la figura 4.2. Sus funciones principales son recepción, procesamiento y actualización del BCP, configuración y control del conmutador, realizar la planificación del núcleo y conmutación óptica de las ráfagas.

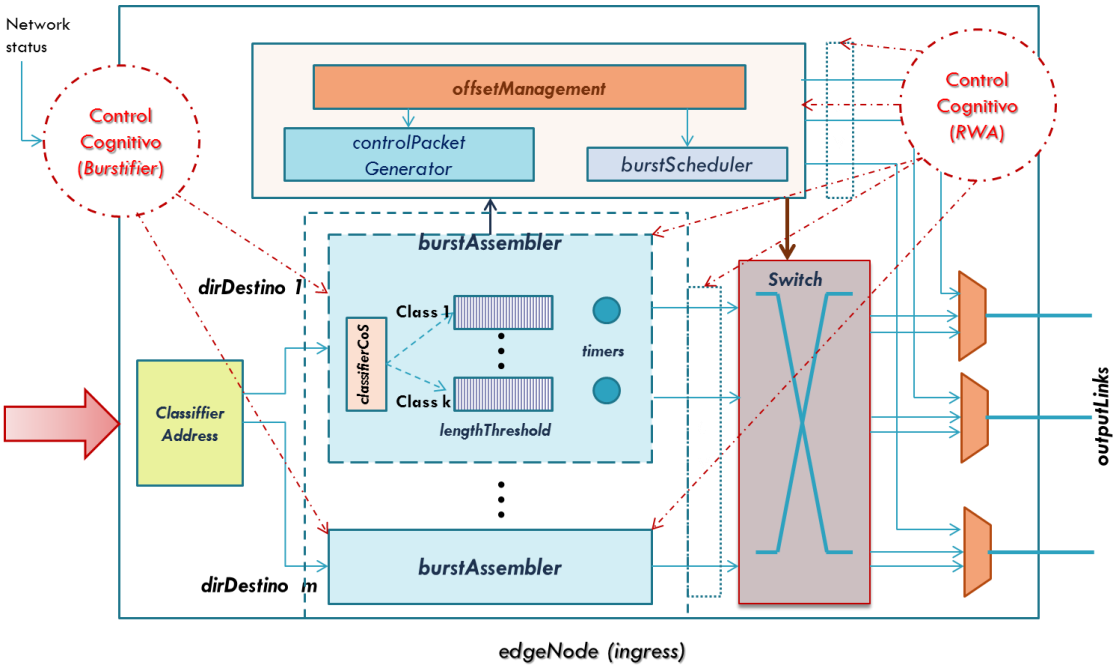


Figura 4.15. Ubicación y aplicación de la meta heurísticas y la cognición

En la figura 4.16 se muestra un diagrama funcional de un nodo central. En el diseño se incluyen FDL.

- **Nodo Compuesto (*compoundNode – mixedNode - edgeCoreNode*),** se trata de unir la funcionalidad de los nodos de borde o frontera con los nodos centrales, como se anotaba anteriormente esto se hace con el objetivo de contar con un nodo de estas características en cada sitio geográfico. La figura 4.17 muestra un ejemplo de esta clase de nodos que constituyen los nodos que forman parte de los modelos de simulación.

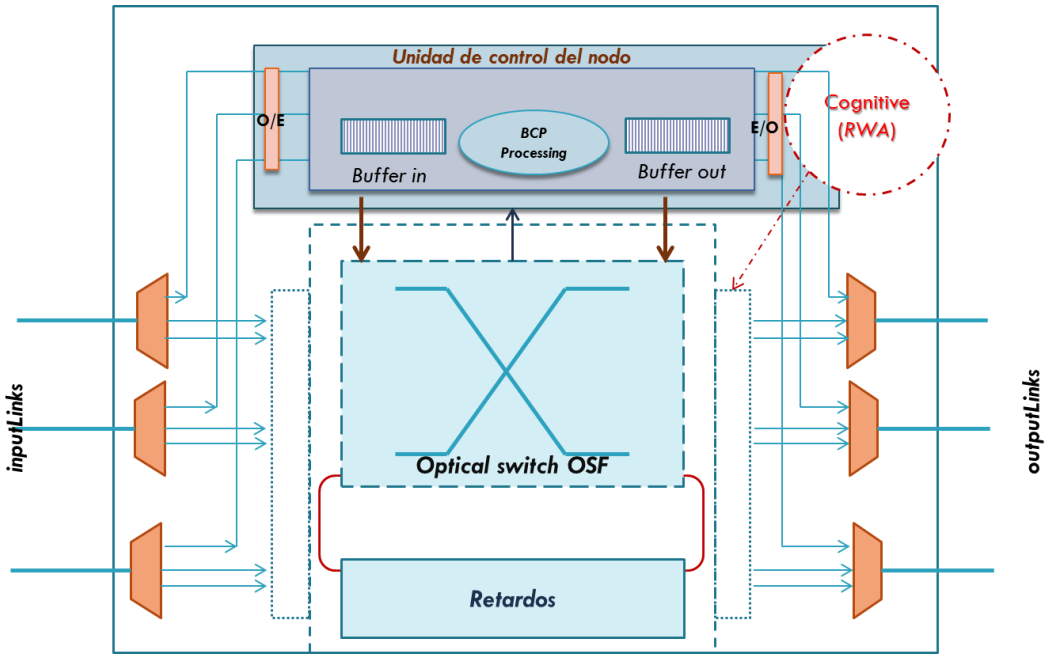


Figura 4.16. Diagrama funcional de un nodo central

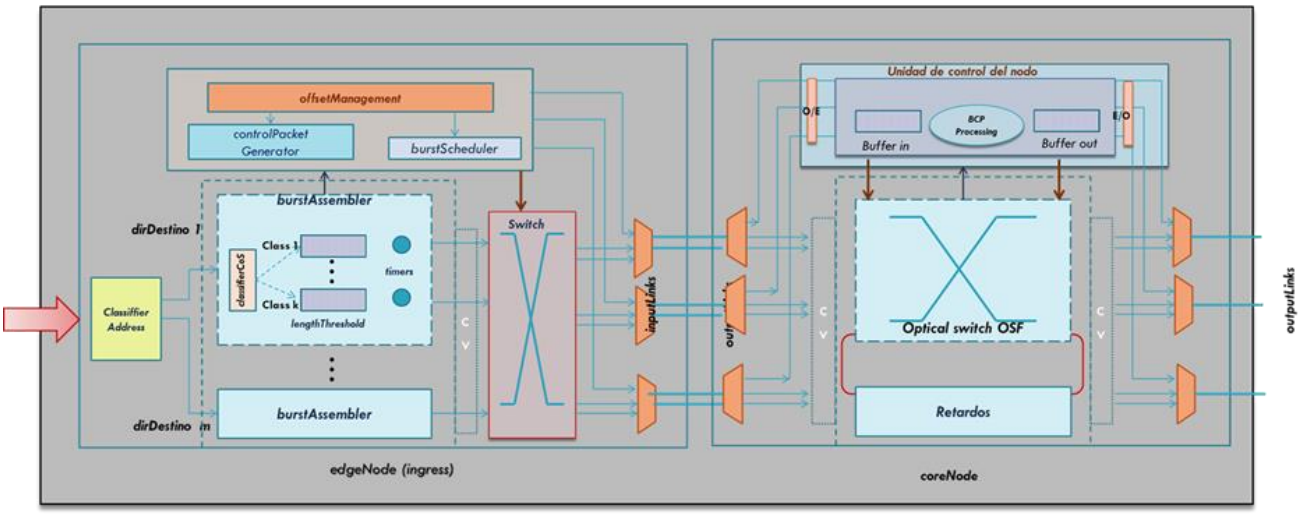


Figura 4.17. Diagrama funcional de un nodo compuesto o mixto

Una vez que se han definido las características de los nodos, se procede a emplear el entorno de desarrollo basado en OMNeT++ para diseñar cada arquitectura de red OBS propuesta. Esta herramienta cuenta con un editor basado en el lenguaje NED o lenguaje para descripción de topologías. El cual es orientado a objetos, lo que permite instanciar los nodos creados para extender la topología, entre otras ventajas que se describen en el manual de usuario que se puede consultar en la dirección http://www.omnetpp.org/doc/omnetpp/manual/usman.html los modelos construidos se muestran en seguida.

- **Construcción del nodo en NED**

  Generación de datos (paquetes IP), Para la construcción de nodo OBS es necesario definir las fuentes de datos, en principio se requiere el empleo de fuentes con enfoque Poisson que son las que generan los paquetes. Los parámetros son dirección de origen, dirección de destino, tamaño de los paquetes IP y el tiempo entre generación de paquetes. La dirección de destino se asigna aleatoriamente tomando valores en el rango del número de nodos que tienen las diferentes topologías. Algunos de estos parámetros pueden ser configurados en archivos de inicialización. Complementando al generador de datos se encuentra un sub módulo que es el repositorio final de los paquetes que son desensamblados.

  A esta combinación se la denomina terminal Host para ser consecuente con la terminologías TCP/IP. La figura 18 muestra el modelo de terminal Host obtenido en NED genérico que se emplea en la construcción de los simuladores, este se puede enriquecer con procesos para medida de parámetros de control en modelos TCP.

  Otra forma de obtener paquetes IP es a través de un generador de tráfico con comportamiento *selfsimlilar* o por ráfagas. Aunque este modelo no se incluye, se recomienda su implementación y prueba por separado para realizar su inclusión en el diseño orientado a *Cross Layer*.

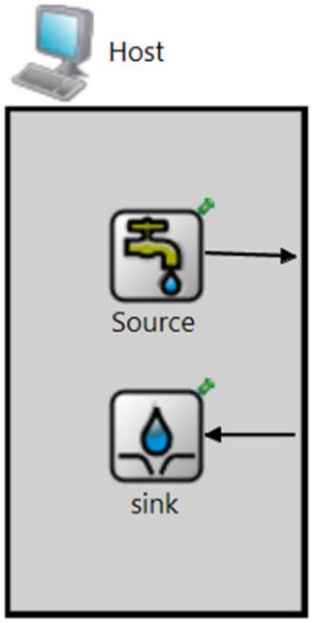
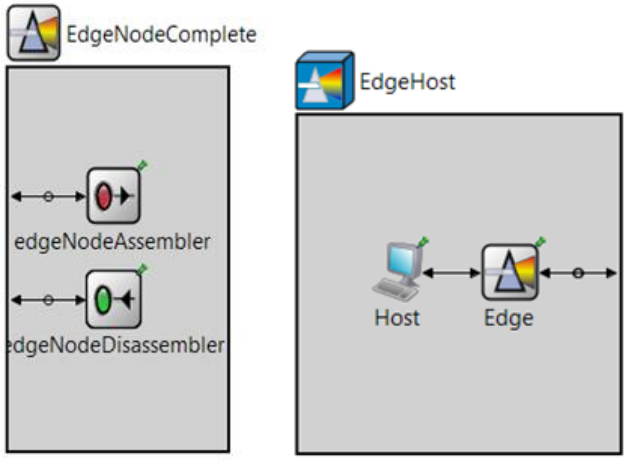
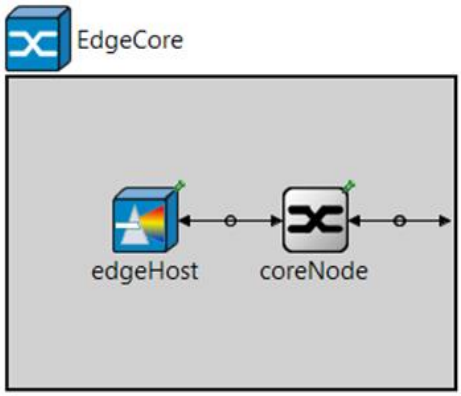


Figura 4.18. Módulo Host fuente – destino

La figura 4.19 muestra el diagrama en (.ned) de un nodo OBS, en a) se muestra el nodo completo ensamblador/desensamblador, en b) el Host TCP como parte del nodo de borde (opcional) y en c) el nodo compuesto por un nodo de frontera o borde en conjunto con el nodo central (tomando elementos de la figura 4.17).



a) b)



c)

Figura 4. 19. Diagrama en NED del Nodo OBS

Al tomar instancias del nodo mostrado en la figura 4.19 c), se procede a construir cada una de las topologías que se muestran en las figuras 4.20 (topología regular totalmente conectada TEST), 4.21 (topología irregular NSFNeT), 4.22 (topología irregular EON) y en 4.23 (topología irregular GEANT2) respectivamente. La herramienta facilita los mapas de Europa y Estados Unidos mas no así el mapa de Colombia.

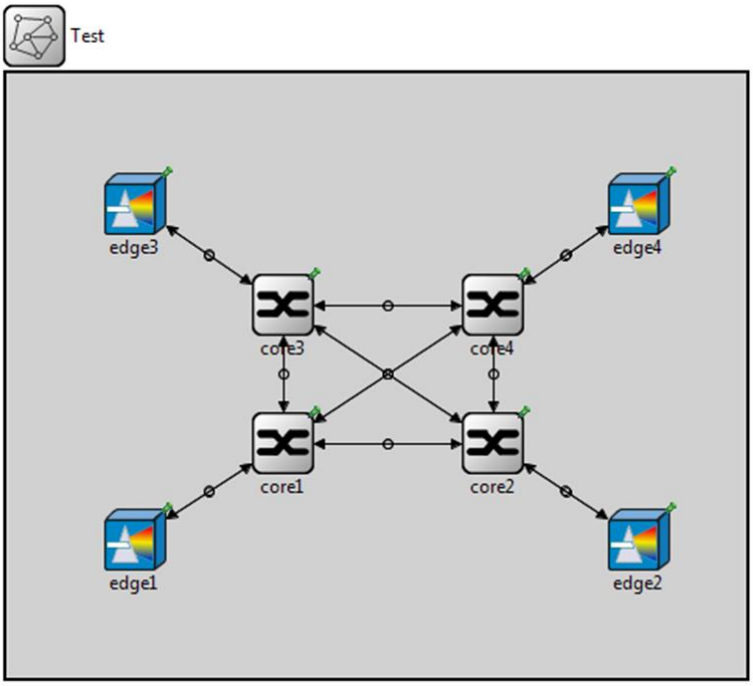


Figura 4. 20. Topología de red TEST

En la topología TEST el editor de OMNeT no contiene el mapa de Colombia, razón por la cual solo se crea una topología regular en malla completamente conectada si la ubicación geográfica de las ciudades principales Santiago de Cali, Santa Fe de Bogotá, Medellín y Barranquilla.

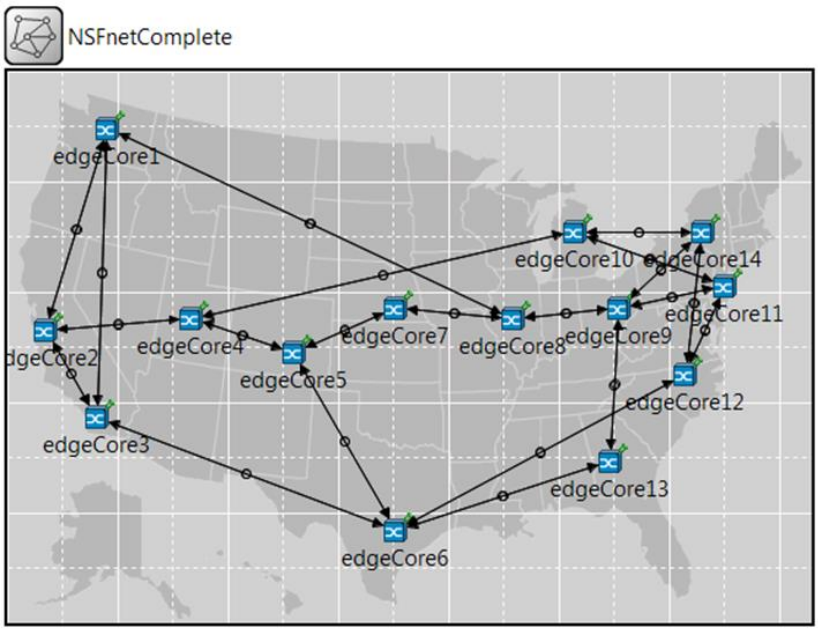


Figura 4. 21. Topología de red NSFNeT

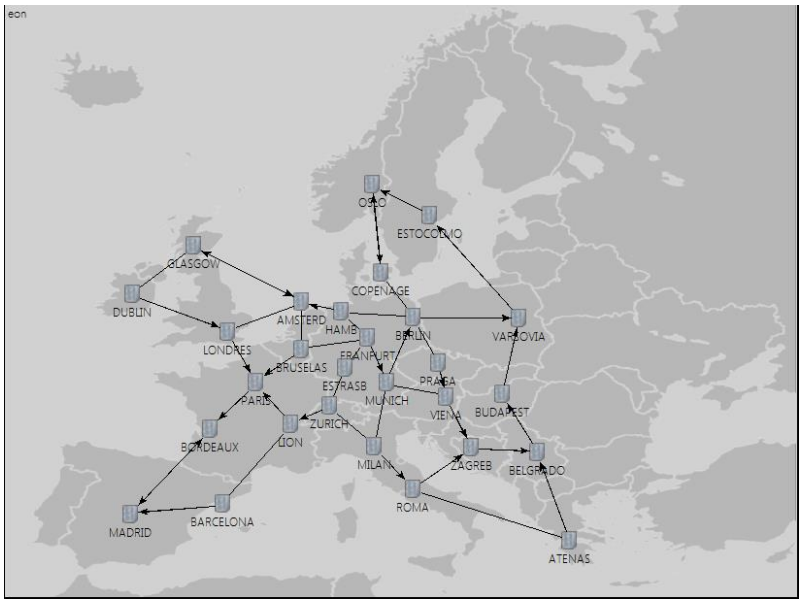


Figura 4. 22. Topología de red EON

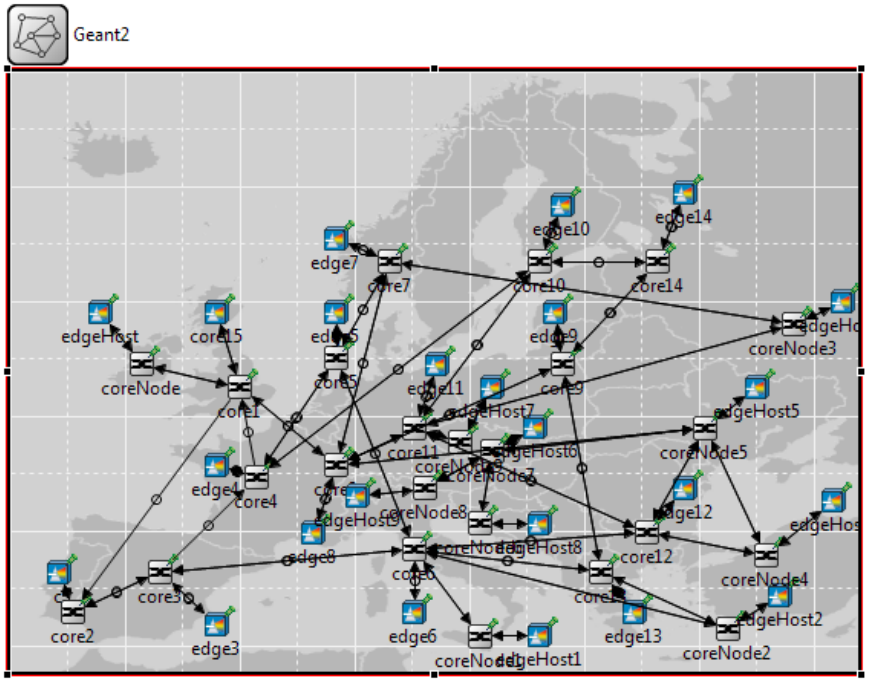


Figura 4. 23. Topología de red GEANT 2

Con estas topologías correspondientes a los modelos físicos, se procede a realizar una de las primeras medidas de desempeño para la red OBS distribuida. Estos resultados obtenidos se mantienen como elementos de comparación con los mismos modelos físicos al agregar meta heurísticas y control cognitivo.

En la sección siguiente se desarrollan meta heurísticas seleccionadas para ser aplicadas en los módulos de la red OBS sobre las funciones RWA y ensamble de ráfagas. Finalmente, se prueba la interacción con TCP con y sin meta heurísticas y cognición.

4.3. Diseño de meta heurísticas para OBS

Una vez se cuenta con el diseño lógico y una propuesta de diseño físico para la red OBS se procede al diseño de meta heurísticas inspiradas biológicamente en especial se emplean meta heurísticas basadas en poblaciones o multi-comienzo como ACO (*Ant Colony Optimization*), PSO (*Particle Swarm Optimization*) y algoritmos evolutivos como los GA (*Genetic Algortihm*) que se incluyen en los nodos compuestos para revisar el comportamiento de los procesos de enrutamiento y asignación de

longitudes de onda, así como ayudar en los procesos de ensamble de ráfagas ya sea eligiendo el método de ensamble que mejor se acerque al comportamiento requerido o se haga una búsqueda de los valores más cercanos a los óptimos para lograr un desempeño de la red OBS que más adelante no ocasione dificultades a la suite de protocolos TCP/IP que pueda soportar.

Las meta heurísticas se incluyen con el objetivo de evaluar el desempeño de las redes OBS obtenidas en la sección anterior.

4.3.1. Selección de las Meta heurísticas a emplear

Las meta heurísticas incluidas en este proyecto se eligen después de una consulta a la literatura al respecto en especial en Talbi (2009) donde se encuentra la referencia más completa y extensa que se pudo encontrar al respecto. Se eligen del grupo de Meta heurísticas basadas en población las siguientes:

- Algoritmos Genéticos GA (*Genetic Algorithms*). En este caso los operadores de búsqueda (que se pueden además modificar dinámicamente durante la búsqueda) se pueden implementar usando mecanismos de *cross over*, mutación, recombinación. Se emplean funciones *fitness* y selección por ejemplo empleando el método de la ruleta sesgada. Estos operadores se pueden ajustar por su comportamiento en ocasiones anteriores donde el pasado si importa, al momento de elegir un operador se elige el que mejores resultados ha obtenido.
- Optimización por Enjambre de partículas PSO (*Particle Swarm Optimization*). Los operadores de búsqueda son la velocidad y la posición (mediante actualización de ambos parámetros). En este caso se usa una función *fitness* tipo imitación.

- Optimización por colonias (de Hormigas o de Abejas) ACO y BCO (*Bee Colony Optimization*). Se selecciona ACO en la cual el aspecto clave es la actualización de la feromona es un operador de búsqueda.

Estas meta heurísticas permiten encontrar soluciones élite las cuales pueden ser almacenadas para efectos posteriores, con esto se logra asociar el concepto de memoria a largo plazo y a corto plazo.

Cuando se persigue una función objetivo, se pueden usar algoritmos de clasificación supervisados para aproximar la función objetivo durante la búsqueda. Las ANN (*Artificial Neural Networks*) pueden emplearse en este caso. Igualmente, si se cuenta con soluciones organizadas por grupos (*clustering*) se puede emplear lógica difusa para su evaluación y encontrar las soluciones más representativas del clúster (esta última parte se deja como idea para un posterior trabajo).

Al realizar un análisis sobre las funciones de la red OBS que pueden ser susceptibles de optimización a través de incluir métodos cognitivos se encuentran las siguientes:

- **Enrutamiento y Asignación de Longitud de onda RWA**: empleo de AG, ACO y PSO para encontrar las rutas y asignar convenientemente las longitudes de onda. Igualmente, para que las poblaciones iniciales no se generen aleatoriamente se puede incluir una red neuronal o lógica difusa para definir dicha población inicial.

- **Ensamble de ráfagas**: empleo de ANN para selección de método de ensamble y AG para selección de parámetros de ensamble.

- **Control de contención:** empleo de ANN para selección del método de control de contención, AG para encontrar las mejores rutas para encaminar las ráfagas de datos. Igualmente, se puede incluir un AG para ayudar al proceso de entrenamiento de la red neuronal.

- **Definición de topologías lógicas**: empleo de AG para construir topologías lógicas con mejores opciones de encaminamiento.

En esta ocasión se han seleccionado las funciones de ensamble de ráfagas y RWA, sin embargo se dan algunas sugerencias en el Capítulo 5 de cómo abordar el control de contención. El tema sobre la definición de topologías lógicas ha sido abordado en detalle por Durán (2008).

En seguida para el desarrollo de los diferentes métodos cognitivos se propone seguir la siguiente metodología:

1. Desarrollo de la forma de aplicación de GA en RWA, definiendo en detalle diferentes aspectos de implementación como algoritmos, diagramas de flujo, código, modelo en NED y código en C++ en el Anexo 11.

2. Propuesta de aplicación de ACO en RWA, se detallan algunos elementos de implementación y se muestran los resultados de la simulación.

3. Propuesta de aplicación de PSO en RWA, se detallan algunos elementos y se muestran los resultados de simulación.

4. Propuesta de aplicación de ANN en los procesos de ensamble de ráfagas, se incluyen diagramas de flujo y resultados de aplicación. Igualmente, se sugiere el empleo de ANN en los procesos de selección de poblaciones iniciales y se sugiere el uso de AG en los procesos de entrenamiento de la ANN.

5. Propuesta de desarrollo del *Cross Layer* entre TCP y OBS. Se muestra la solución gráfica, los diagramas de flujo y los resultados de comportamiento respecto a los mecanismos de control de flujo y congestión en TCP.

4.3.2. Empleo de GA (*Genetic Algorithms*) en RWA

Además de lo anotado en el Apéndice B sobre GA, se recuerda que los algoritmos genéticos expresan a cada individuo mediante un código, usando para esto representaciones binarias, reales, matrices, en árbol, con permutaciones. En este orden de ideas los GA se caracterizan de la siguiente manera, Figura 4.24.

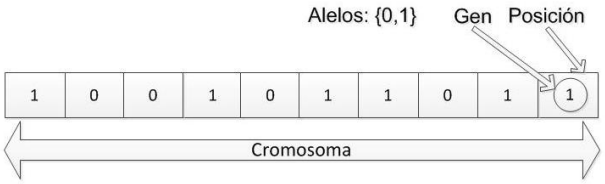


Figura 4.24. Estructura de un GA clásico

- El conjunto total de números binarios que forman la cadena de valores se conoce como cromosoma.
- Cada uno de los valores dentro del cromosoma se denomina gen.

- El valor que tomen los genes (ya sea 1, 0 u otro valor real) se denomina Alelo.

La anterior descripción sobre los algoritmos genéticos permite diferenciarlos de otros métodos de búsqueda y optimización en los siguientes aspectos.

- Los parámetros con los cuales trabajan son codificados.
- La búsqueda de la solución comienza con una población generada de manera aleatoria.
- Usan una función de aptitud orientada a la optimización.
- Usan métodos probabilísticos como reglas de transición.

- **Generación de individuos aleatorios**

Inicialmente, antes de usar los operadores genéticos, es necesario contar con una población a la cual aplicárselos. La población habitualmente se escoge generando individuos de forma aleatoria, los cuales representan soluciones aptas, más no las mejores; sin embargo, esto es lo más recomendable ya que no se aconseja obtener la población inicial mediante procesos de optimización u otros métodos heurísticos, porque puede ocurrir que el algoritmo genético converja prematuramente, obteniendo posiblemente soluciones dentro de óptimos locales.

- **Función de aptitud (*fitness*)**

Dentro del comportamiento de los algoritmos genéticos, uno de los aspectos trascendentales es la creación de una función que permita sintetizar, en un factor de calidad, la aproximación de una posible solución a un objetivo conjunto.

La función de aptitud permite evaluar qué tan bueno es determinado individuo para alcanzar un punto óptimo, esto con el fin de realizar la selección de los padres que formarán la próxima generación de soluciones al problema.

Lo más importante de una función de aptitud es la encontrar valores de individuos que se acerquen al óptimo global, aunque cabe la posibilidad de obtener individuos no válidos para el espacio de búsqueda.

- **Operadores Selección, Cruce y Mutación**

El primer operador que actúa en el algoritmo genético se denomina Selección y es el encargado de elegir un número de individuos (generados como se explicó anteriormente), los cuales harán parte de la población inicial para su posterior reproducción. Algunas formas de seleccionar los individuos incluyen: estrategias que involucran la generación de soluciones aleatorias mediante técnicas de distribución uniforme, la técnica de la Ruleta de Rueda, ventanas, competencias o procedimientos adaptados al problema que se pretende resolver (Melanie 1999; El-Mihoub, *et al.* 2006; Talbi 2009).

Una de las técnicas más usadas para intercambiar la información genética entre dos individuos se denomina operador cruce basado en un punto y se efectúa dividiendo aleatoriamente las ristras de dos cromosomas padres para obtener dos cadenas iniciales y finales, éstas últimas se intercambian entre sí obteniendo dos cromosomas nuevos correspondientes a los descendientes o hijos, los cuales entrarán a formar parte de la población y de una nueva generación, como muestra la Figura 4.25.

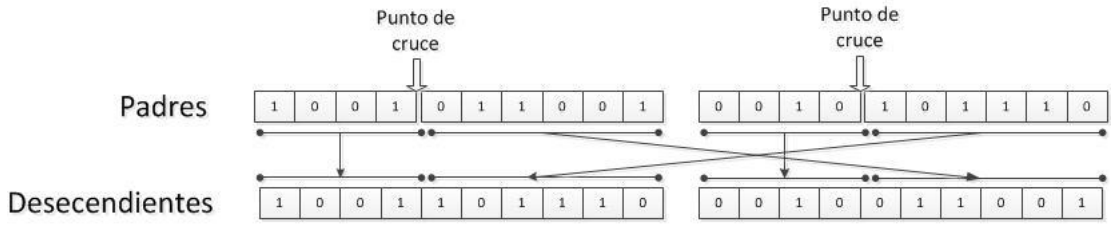


Figura 4.25. Operador cruce basado en un punto (cadenas de longitud l = 10)

La mutación se encarga de variar un gen de uno o más cromosomas en lapsos separados a lo largo de la población como muestra la Figura 4.267.

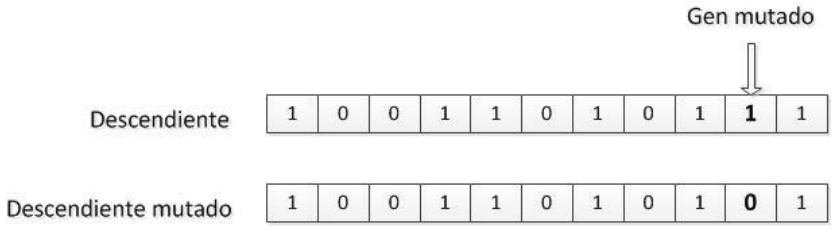


Figura 4. 26. Operador mutación

Habiendo aplicado el Algoritmo Genético de forma correcta, se espera que la población converja hacía un óptimo Global, es decir, que después de las iteraciones realizadas se encuentre la solución más adecuada y cercana a la correcta para el problema tratado.

- **Aplicación a la solución RWA**

El proceso del GA comienza con un número determinados de individuos, cada uno de los cuales se presenta como una posible solución al problema RWA. Dichos individuos representan posibles rutas entre un origen (s) y un destino (d) que se deben especificar con antelación (ver figura 4.27). Para obtener las rutas iniciales se acude a una función que genera rutas aleatoriamente o a una función que organice las rutas para que no se utilice tiempo con rutas que sean posibles por su generación aleatoria.

Por otra parte, la analogía entre las redes de comunicaciones y los procesos genéticos viene dada por el camino que seguirá la información, el cual es representado por un cromosoma (Lo *et al.* 2003) y (Bhanja, Mahapatra & Roy 2010), que a su vez está compuesto por genes, alusivos a los nodos de la ruta óptica. Para este proceso, el camino óptico se codifica usando una cadena de enteros, donde cada número hace referencia a un nodo perteneciente a la ruta.

.

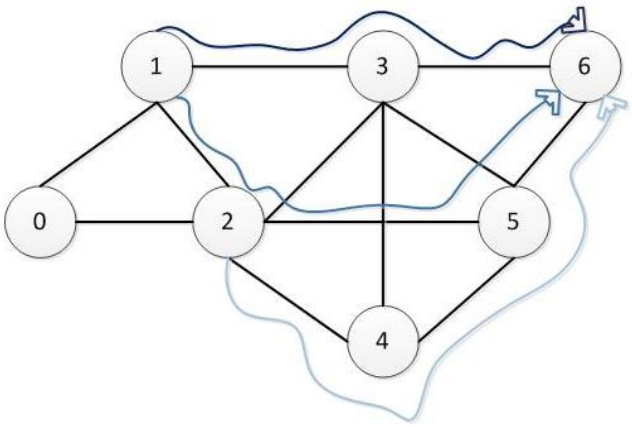


Figura 4.27. Representación codificada tres rutas. En orden de arriba-abajo: {1, 3, 6}, {1, 2, 5, 6}, {2, 4, 5, 6}

La figura 4.28 muestra el diagrama de flujo siguiente puede servir de guía para definir el comportamiento del GA aplicado a RWA en redes OBS.

- **Generación de la población en la red OBS**

En primera instancia se debe generar aleatoriamente la población inicial de individuos, ésta hace referencia al número de rutas que se desean obtener, estableciendo con anticipación el hecho que todas las rutas tienen en común el nodo de origen y destino. Su operación empieza ubicándose en el lugar desde dónde se transmitirá la información en el nodo respectivo. Desde este punto escoge aleatoriamente un nodo i cuya posición sea adyacente al nodo de origen, una vez determinado, el nodo se marcado como visitado.

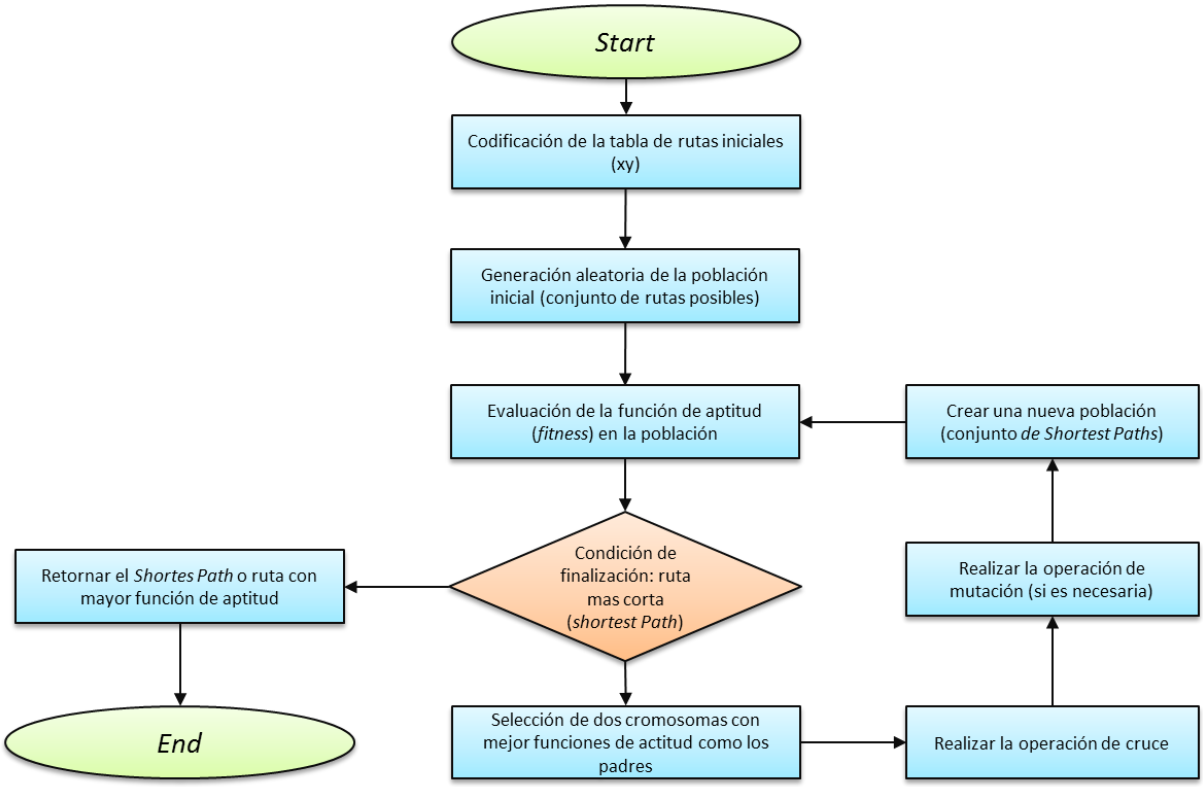


Figura 4.28. Diagrama de flujo para la operación del GA

Estando en la posición i, la función realiza de nuevo la búsqueda y selección para establecer el siguiente nodo. El proceso se repite varias veces y finaliza una vez se llegue al nodo de destino, o bien, cuando todos los nodos adyacentes a la posición

actual ya hayan sido visitados; en este último caso la función comienza de nuevo. El número máximo de rutas creadas no debe exceder al establecido durante el diseño del algoritmo.

Una vez obtenida la ruta, se debe validar que no pertenezca al conjunto de rutas obtenidas anteriormente o debe ser descartada. Si una ruta generada tiene como dirección de destino la misma dirección de origen, no se implementa el GA ya que la ráfaga va dirigida hacia el mismo equipo. Igualmente, en la herramienta OMNeT++ se encuentran funciones que implementan otras formas de generación de estas rutas, estas funciones realizan procesos de descubrimiento de rutas las cuales quedan almacenadas para su posterior uso, en esta ocasión se puede emplear un mecanismo de clasificación como una ANN para generar un conjunto de rutas que sirvan como población inicial para el GA.

La población inicial es evaluada mediante una función de aptitud que muestra numéricamente la bondad de los individuos del espacio de búsqueda de la primera población.

- **Definición de la Función *Fitness* o de Aptitud**

Para el desarrollo de la función de aptitud se integra información que permite disminuir la probabilidad de bloqueo en la red como: el número saltos, la distancia entre nodos y el número de fibras conectada a cada nodo de la red (Kabian *et al.* 2009).

En seguida se incluye el costo, que permite analizar en qué proporción se ve afectada una red con respecto a un factor específico. Para evaluar los individuos con las características mencionadas anteriormente se tienen en cuenta dos (2) funciones de costo, la ecuación 4.9 describe la primera.

$$C1 = s + \alpha \sum_{i=1}^{s} (Li - Lf\ i) \quad (4.9)$$

La función de costo $C1$, permite analizar el impacto creado por el número de saltos en una ruta y las longitudes de onda libres de ésta, donde s es el número de saltos, L el número de longitudes de onda en la ruta, Lf el número de longitudes libres y α un parámetro de diseño que varía entre 0 y 1. Le et al. (2005) encontraron un valor

máximo para α que dependa del número de longitudes de onda del enlace (ecuación 4.10).

$$< \frac{1}{W-1} \ (4.10)$$

La segunda función, representa la congestión de cada nodo generada por el número de enlaces conectados al mismo, entre más conexiones presente con otros, su congestión aumentará, el costo $C2$ representa la sumatoria de los enlaces de cada uno de los nodos sobre una ruta, esto se muestra en la ecuación 4.11 donde Ei representa el número de conexiones de cada nodo en la ruta.

$$C2 = \sum_{i=1}^{n} Ei \ \ (4.11)$$

De otro lado, la Función de Aptitud es inversamente proporcional a la función de Costo, las ecuaciones 4.12 y 4.13 muestran las expresiones matemáticas para las Funciones de Aptitud resultantes son:

$$F1 = \frac{1}{s + \alpha \sum_{i=1}^{S} (Li - Lfi)} \ (4.12)$$

$$F2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} (Ei)} \ (4.13)$$

En la ecuación 4.13 sobre F2 se debe realizar una restricción ya que al no haber nodos intermedios en la ruta el resultado de la sumatoria de los enlaces es cero, lo que genera un valor infinito para dicha función, es decir, un individuo no válido en el espacio de búsqueda; como el objetivo es encontrar un óptimo global real, se recurre a un método de restricción y reconstrucción de dicho valor. Para el caso puntual de esta Tesis, si dicha función genera un resultado infinito, éste valor se hace igual a 1, representando el máximo valor que toma la función. Se sugiere trabajar con $F1$ y $F2$ para efecto de seguridad en la evaluación.

El valor de aptitud máximo en la red es 2, siendo éste el resultado de la suma de las dos funciones anteriores, sin embargo, para el establecimiento del criterio de aptitud máximo, se realizan unos cálculos con los parámetros de diseño de la red mostrados a continuación:

- En $F1$ una ruta óptima se obtendría cuando existen la menor cantidad de saltos en la red y todas las longitudes de onda se encuentren disponibles (casi ideal), lo que

generaría como resultado el punto máximo de la función (1), seguido de un valor de 0.5 para una ruta con todas las longitudes de onda libres y solo dos (2) saltos.

- En $F2$ se debe analizar el valor de enlaces posibles que presenta cualquier nodo en la red, y cuál es el más frecuente dentro de ésta. Se obtienen como resultados 0.5, 0.33 y 0.25 para 2, 3 y 4 enlaces por nodo respectivamente, con 0.33 el valor más común en dicha red (para 17 de 21 enlaces); cabe resaltar que si una ruta presenta solo un salto su valor máximo sería 1 (valor de la restricción para enlaces entre nodos adyacentes).

En resumen, los valores de aptitud máximos los obtendría una ruta con las siguientes características:

Una ruta con un solo salto y con todas las longitudes de onda disponibles con un valor de aptitud de 2, una ruta con dos saltos, todas las longitudes de onda disponibles y con un nodo intermedio que presente dos enlaces con un valor de aptitud de 1, y una ruta con dos saltos que presente un nodo intermedio con 3 enlaces, con todas las longitudes de onda disponibles y un valor de aptitud de 0.88 (valor de aptitud más frecuente aplicable por ejemplo a NSFNeT).
Entonces se elige como criterio de aptitud máximo 1, que abarca las dos mejores rutas y se fija el siguiente rango de comparación en 0.88. En seguida, las $F1$ y $F2$ se aplican en las rutas obtenidas para realizar el proceso de selección.

- **Función de aptitud (*fitness*) para la evaluación de las rutas en la red OBS**

Como se recuerda, el primer paso para la ejecución de la función de aptitud en la herramienta de simulación es el descubrimiento de todos los parámetros que influyen en la probabilidad de bloqueo de la red como: saltos, número de enlaces por nodo y longitudes de onda libres en la ruta.

Para realizar este proceso se analiza el vector de tiempos presente en la clase "*Routing Nuevo*", este valor depende del número de "puertos" y el número de "*lambdas Core*" (longitudes de onda por enlace) de ese nodo. El Algoritmo LAUC muestra las longitudes de onda libres u horizontes en el puerto y los enlaces de cada nodo son descubiertos mediante la función *cTopology* descrita en el Anexo 11 y en el

manual de OMNeT++ (se encuentran los costos y posteriormente se encuentran $F1$ y $F2$).

Teniendo los valores necesarios para resolver las funciones ($F1$ y $F2$), se implementan las operaciones para obtener la aptitud de los individuos. Dado que la segunda función presenta una restricción, se define un reparador que le asigna el valor “1” si su resultado inicial tiende a infinito.

- **Operadores de evolución**

La selección de los individuos para la creación de la nueva generación, debe realizarse de la mejor manera con el fin de obtener la solución óptima en un tiempo apropiado, en el proyecto actual se emplea el método de la ruleta sesgada (Talbi 2009).

Todos los individuos con su respectivo valor de aptitud se almacenan en un vector, el método implementado para la selección asigna a cada individuo del arreglo un sector circular proporcional a su función objetivo, como muestra la Figura 4.29. Aquí se muestra como el individuo $I1$ es elegido dos (2) veces, los $I2$ e $I3$ una vez y el individuo $I4$ ninguna.

Para la asignación de los sectores a las rutas, se divide el valor de la aptitud de cada ruta entre la suma de todos los valores de aptitud. Los individuos son seleccionados al girar una única vez la ruleta, para esto se crea un valor aleatorio que se encarga de elegir un sector (ver figura 4.29). Como resultado las rutas que poseen el valor de aptitud más alto tendrán una mayor probabilidad de ser seleccionadas para generar una nueva población.

Una vez terminado el proceso de selección, las rutas son almacenadas en vectores que se analizan para descartar aquellas que no son aptas (por ejemplo: las que poseen solo dos nodos o son destinos adyacentes), para aplicar el operador de cruce. Seguidamente se busca en las rutas aptas un elemento en común (números iguales que no se encuentren en la primera o en la última posición) para combinar las rutas y obtener descendencia.

La ruta obtenida no puede contener dos nodos iguales, ni debe ser igual a una ruta almacenada (rutas padres), si es así se descarta, de lo contrario, se guarda y es aplicada la función de aptitud a cada uno de los hijos.

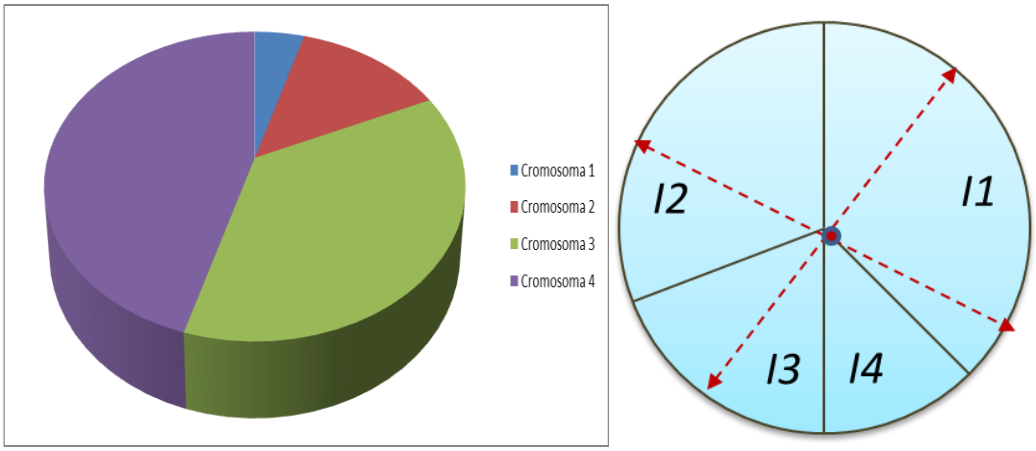


Figura 4.29. Método de selección de Ruleta sesgada

El operador de mutación no fue aplicado a esta red OBS, básicamente porque el uso de este podría afectar el rendimiento del sistema (Kavian *et al.* 2009). Su utilización puede ocasionar la perdida de individuos aptos, lo que genera retardos en la convergencia; razón por la cual los proyectos realizados con dicho operador trabajan con probabilidades de mutación muy bajas (Cheng & Yang 2010). La figura 4.30 resume lo anotado mediante un diagrama de flujo.

Finalmente, el algoritmo genético fue implementado en el módulo denominado “RoutingNuevo”, incluido en el nodo central y encargado de las tareas de conmutación y enrutamiento.

Además, el GA se ejecuta siempre que una ráfaga presente una solicitud de un camino para llegar a su destino, razón por la cual, éste es llamado desde el nodo frontera, específicamente en el módulo “*sender*”, el cual realiza las tareas de señalización y del envío de la ráfaga a la primera longitud de onda disponible.

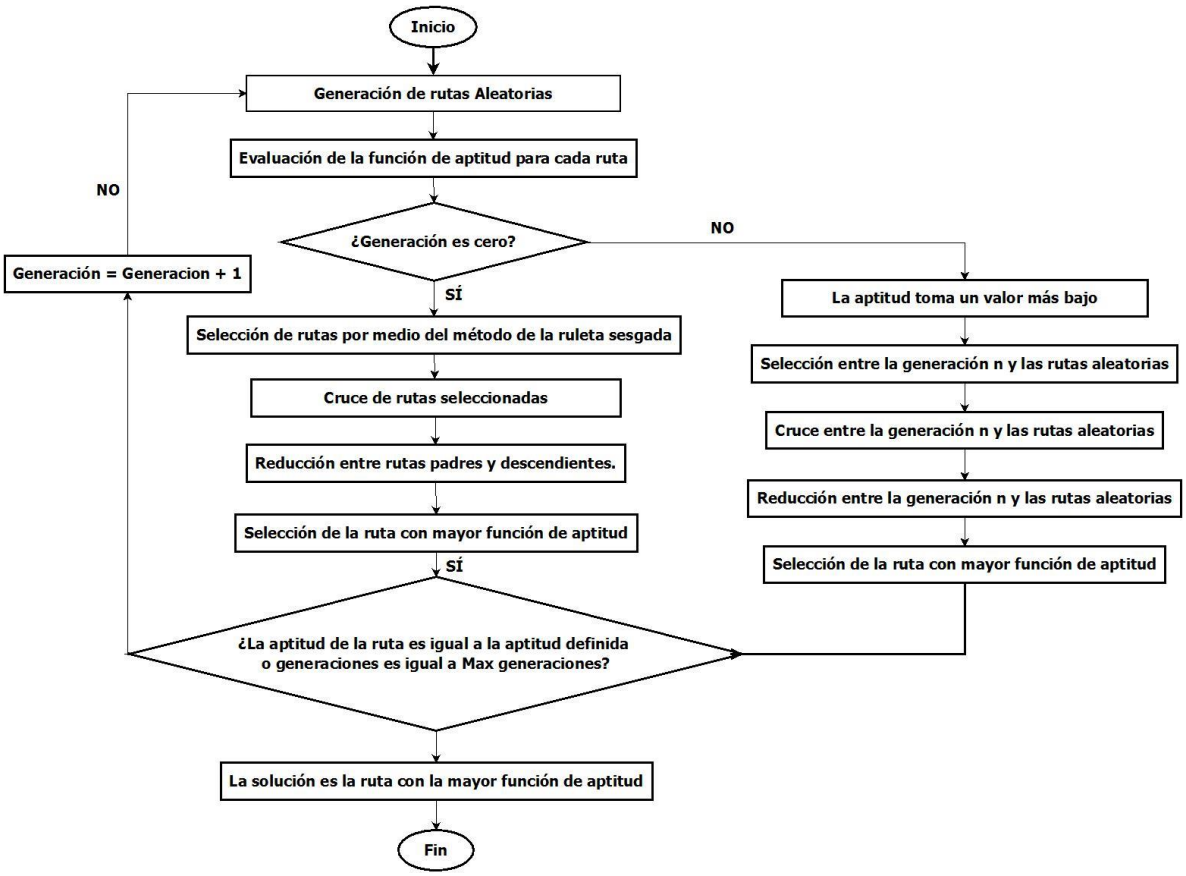


Figura 4.30. Diagrama de flujo del GA

Teniendo en cuenta que el algoritmo genético se realiza para resolver RWA de tipo dinámico, la ruta resultante de este método debe viajar dentro del paquete de control, eliminando en cada salto el nodo correspondiente a la posición actual, hasta que el camino solo contenga el nodo de destino y una vez la ráfaga llegue, también sea eliminado.

Finalmente en la figura 4.31 se muestra el diagrama de generación de rutas incluyendo el método de control cognitivo, este método presenta un factor adicional que añade dinamismo y amplia el espacio de soluciones: si una nueva ruta es generada y el vector de vectores se encuentra lleno, éste descarta la ruta correspondiente a su última posición y permite el ingreso de la nueva solución en la primera posición del vector de vectores, corriendo a las demás respuestas, una casilla. Esto garantiza que las rutas analizadas no correspondan a las ya analizadas.

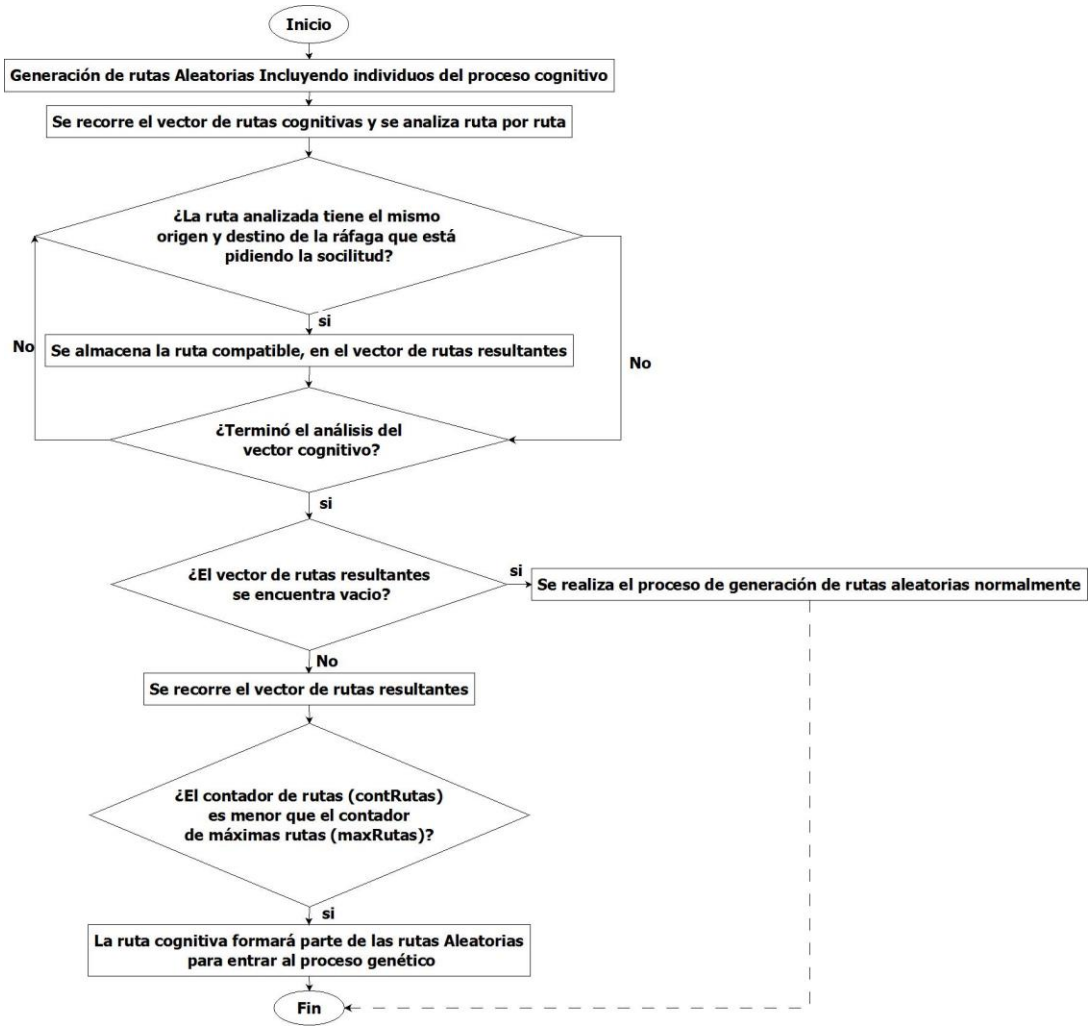


Figura 4.31. Generación de rutas incluyendo control cognitivo

Hasta el momento se ha hecho una descripción con mayor detalle sobre el empleo de GA y GA con cognición, la forma de organizar las rutas y ordenar el algoritmo, además de los procesos de inclusión de cognición, son similares a los seguidos con ACO. Por lo tanto para la descripción de estas meta heurísticas se tratará solo lo concerniente al funcionamiento general.

4.3.3. Empleo de ACO (*Ant Colony Optimization*) en RWA

Los sistemas basados en Colonia de Hormigas (Di Caro *et al.* 1999) propuesto como una alternativa para la optimización discreta y como aproximación a los problemas NP como el caso de RWA y teniendo en cuenta la forma como se desplazan las

hormigas (por ejemplo las arrieras o corta hoja) desde el nido hasta encontrar la comida (hojas que realmente emplean como base para sus cultivos de pequeños hongos). Este proceso llevado a la computación por Dorigo (1992) y posteriormente conocido como sistema de hormigas o AS (*Ant System*) (Dorigo, Maniezzo & Colorni 1996) tiene una compatibilidad natural con los procesos de encaminamiento de redes, ya que lo que se busca es una ruta óptima.

Igualmente, dada la relación entre la representación de una red y un grafo AS se aplicó a la solución del famoso problema del vendedor viajero TSP (*Travel Salesman Problem*) logrando una solución aproximada válida. Lo anterior sumado a otros aspectos como auto organización, descentralización y la actuación particular de cada individuo sin tener un supervisor. Pero incluyendo procesos de interacción entre los mismos (comportamiento denominado *stigmergy*) permiten definir un sistema que está compuesto por entidades simples y pequeñas con habilidades para adaptarse se los cambios en el entorno y guardar información sobre marcas relevantes que les permiten seguir una ruta especifica (similar a las feromonas).

Este comportamiento social les permite converger a soluciones válidas para un problema. Mediante la manipulación de las feromonas especialmente por refuerzo, es posible encontrar una ruta con mayor cantidad de feromona la cual será seguida por las demás hormigas. Sin embargo, si las rutas no son las mejores, estas se evaporan y no permanecen en el espacio de soluciones. Al igual que el caso de los AG se puede comenzar con rutas aleatorias, aunque en esta ocasión se pueden enviar un numero aleatorio de entes que parten desde un nodo fuente s a través de la topología de red y que encuentran rutas hacia un nodo de destino $d,\ ruta\ (s, d)$. Un aspecto interesante de la aleatoriedad consiste en contar con la posibilidad de encontrar nuevas soluciones.

Cuando se trata de encontrar un espacio de posibles rutas se asume que el espacio cerca de cada nodo es homogéneo, es decir no hay interacción previa de otras fuentes y elementos desplazándose por el entorno. Es importante tener en cuenta que el comportamiento natural de las hormigas las lleva por lo general a retornar al nido u hormiguero para reportar el hallazgo, este regreso aumenta la feromona en el camino y provoca que más hormigas sigan esa ruta encontrada. La figura 4.32 se

puede adaptar a este escenario y en particular siguen objetivos similares de la solución propuesta con Algoritmos Genéticos.

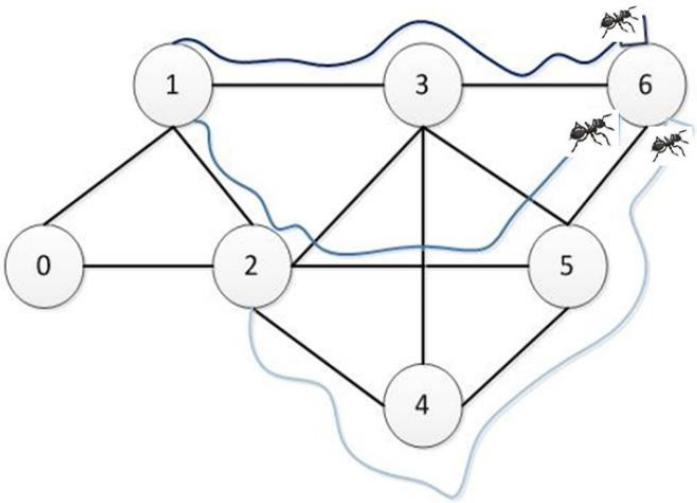


Figura 4.32. Representación de tres (3) rutas con el mismo destino. En orden de arriba-abajo: {1, 3, 6}, {1, 2, 5, 6}, {2, 4, 5, 6}

Como se observa, al recrear este proceso en un ambiente artificial es necesario crea un ambiente inicial de tipo aleatorio lo que se conoce como regla de transición del estado estocástico. Por lo general se comienza en el lugar desde donde se transmitirá la información (ráfaga), se anota que el número de rutas máximo se debe pre establecer y que las rutas generadas deben tener los mismos s y d. Se recorre el entorno comenzando por los nodos adyacentes, luego se marcan los nodos visitados.

Se recuerda que al usar ACO, la propiedad clave de las hormigas es la habilidad para encontrar los caminos más cortos entre s y d. Con la ayuda de funciones presentes en la herramienta de simulación es posible realizar el descubrimiento de la red. Igualmente las condiciones de las redes de prueba siguen conservándose como para el caso de AG. Entre ellos no se cuenta con convertidores de longitudes de onda y se presenta restricción en el uso de la longitud de onda.

Se puede entonces suponer que cada vez que se tiene un requerimiento de ruta una vez se ha ensamblado la ráfaga, se pueda acudir a una de las soluciones obtenidas.

Para encontrar un conjunto de rutas que puedan ser empleadas como solución cercana al óptimo de las cuales se pueda seleccionar la que tenga mejores prestaciones al momento de existir un requerimiento de ruta para una ráfaga recién ensamblada. Entonces se comienza por asignar una cierta colonia dependiendo del número máximo de rutas a encontrar. Para este caso se procede como en AG, se define un vector de vectores de rutas que tienen el mismo origen y diferentes destinos para mantener un conjunto de rutas disponibles para cualquier requerimiento de transmisión. Al momento de presentarse una solicitud de ruta si dentro de las rutas obtenidas existe alguna que coincida con los datos de fuente y destino de la ráfaga solicitante esta ruta puede guardarse ya sea para una próxima solicitud, para crear un grupo de rutas inicial o para comparar si puede ser desechada. Esto implica que la experiencia obtenida puede emplearse para generar futuras soluciones.

El proceso es el siguiente: si se cuenta con un número máximo de rutas (maxRutas) solicitadas, se elige un numero de colonias C (*Colonies*) igual a maxRutas, se restringe en hecho que cada hormiga solo sigue la ruta que haya seguido otra hormiga de su colonia c (*colony*) sin tener en cuenta las otras hormigas.

Al comienzo del algoritmo se toma una hormiga de cada colonia $c = \{1, 2, 3, \ldots, C\}$ se coloca en movimiento con los datos de fuente y el destino a encontrar (s, d). Esta hormiga viaja por la red hasta encontrar el nodo destino y se desecha[44]. Debido a que en su paso por la red la hormiga ha seguido un camino, esta debe dejar un valor de paso o de viaje (feromona) sobre los diferentes puertos de salida que haya elegido en su búsqueda de un nodo destino. Luego de cierto tiempo (aleatorio) se envía un nuevo individuo de la misma colonia la cual lleva la misma dirección de destino. Esta puede buscar el nodo más cercano para visitar en el cual encontrará rastros de otra u otras hormigas que hayan depositado la feromona en los puertos que posee cada nodo hacia un nodo siguiente. La figura 4.33 muestra gráficamente lo descrito hasta el momento.

Una vez que se cuenta con el algoritmo, se procede a incluirlo en los nodos de la red OBS, tanto en los nodos de borde o frontera como en los nodos centrales, finalmente

[44] Se puede trabajar con un escenario donde la hormiga encuentra el destino y regresa reforzando la cantidad de feromona, esta opción se puede implementar sobre OBS centralizado o cuando se utilice JIT en doble vía.

en la figura 4.34 se muestra un diagrama de flujo sobre la operación de la meta heurística basada en ACO para OBS.

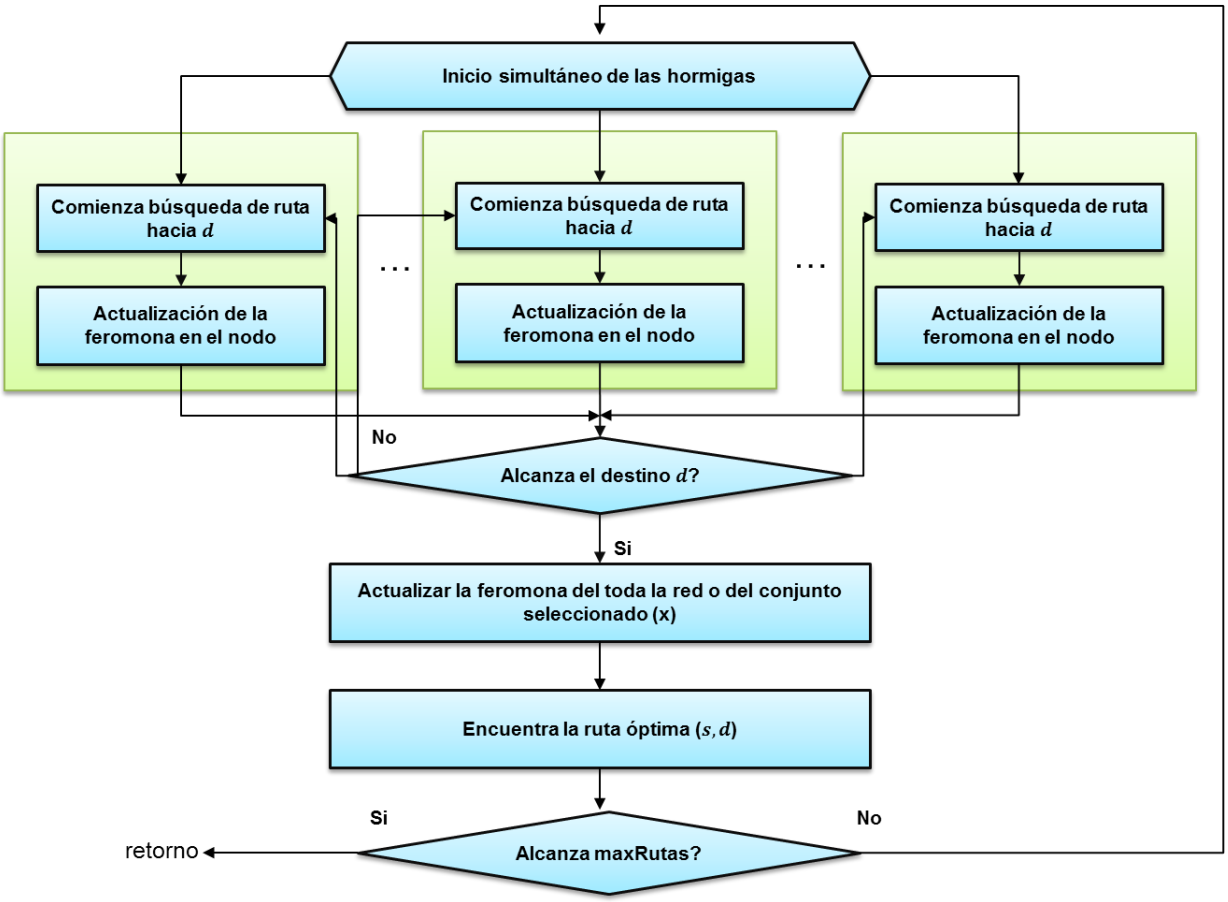


Figura 4.33. Proceso típico que sigue un algoritmo ACO

Como se recuerda, OBS en su versión distribuida utiliza un paquete de control o BCP (*Burst Control Packet*) que viaja por la red siguiendo una ruta previamente seleccionada desde un nodo s a un nodo d, este paquete puede comportarse como una hormiga que configura la ruta para que la ráfaga pase a través de la red hacia su destino (en el plano de datos).

Para esta ocasión se propone que cada hormiga sea un pequeño paquete de control similar al BCP (*ant packet*) el cual es creado en el nodo de borde (específicamente en el módulo "sender") y en el módulo "RoutingNuevo", se realiza el proceso de depositar la feromona y decidir por cual ruta continuar dependiendo de la concentración de feromona en cada puerto de salida hacia el próximo nodo.

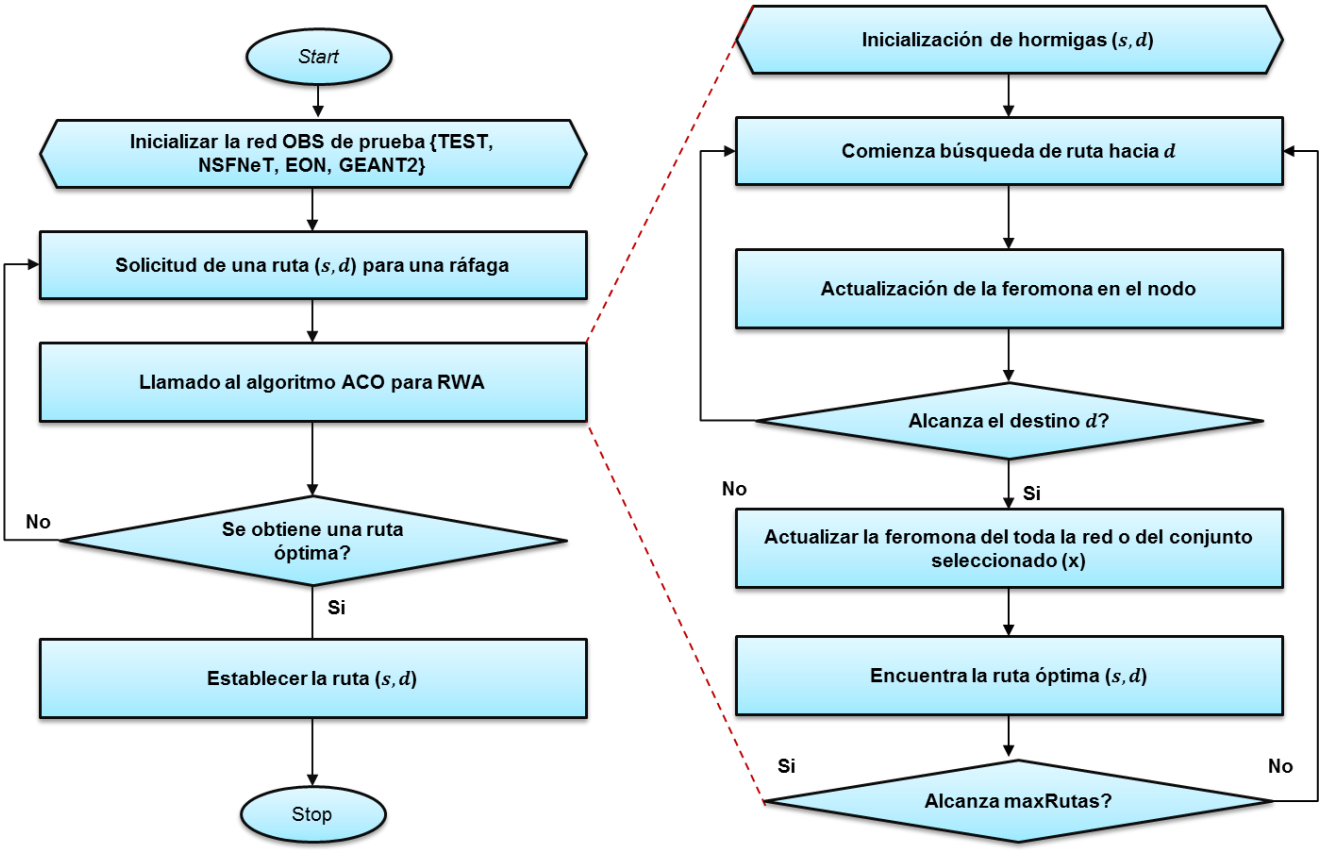


Figura 4.34. Diagrama de flujo para ACO

En las topologías regulares el número de puertos de salida hacia otros nodos es siempre el mismo, mientras que en las topologías irregulares el número de puertos puede variar. Ahora, cada vez que una hormiga tenga que decidir el camino a seguir hacia el próximo nodo lo puede hacer evaluando la probabilidad de distribución de la feromona por puerto (esta acción se conoce como la evaluación del peso de atracción y repulsión), igualmente, mediante la asignación de memoria a la hormiga esta evita visitar dos veces el mismo nodo (Navarro & Sinclair 1999). Entonces en un instante de tiempo t una hormiga de la colonia c asociada a una ruta (s, d) puede seleccionar un enlace de salida l (*link*) para dar su próximo paso con la probabilidad que se puede calcular según la fórmula de la ecuación 4.14.

$$P_{c,l}(t) = \frac{f_{c,l}}{\sum_{l \in A} f_{c,l}} \quad (4.14)$$

En esta ecuación $f_{c,l}$ es la cantidad de feromona depositada en el enlace l asignado a la ruta (s, d) de la colonia c. El conjunto A contiene los enlaces permitidos para una hormiga en particular, es decir aquellos enlaces cuya fuente es el nodo actual y el nodo que se tiene como objetivo a visitar, pero que aún no se ha visitado. Es decir que para la construcción del camino cada hormiga (artificial) puede revisar la lista de los nodos alcanzables desde el que se encuentra y elige a cual pasar, para esto se emplea una regla de transición mediante la definición de la probabilidad que una hormiga situada en un nodo i pase a un nodo j. Además la regla depende de la información heurística (definida previamente y no modificable por las hormigas) y la información memorizada (representa la cantidad de la feromona y es modificable por la hormiga). La selección del nodo siguiente es función de la probabilidad que tiene asignada (emplear la ruleta sesgada).

Después de transcurrido cierto tiempo se supone que la hormiga encuentra el nodo destino. Una vez que esto sucede, se debe actualizar la feromona de cada nodo, esto puede hacerse con un mensaje similar a un ACK o mediante una función matemática que finalmente muestra que la ruta más corta es la que siguen la mayoría de hormigas de la colonia c hasta llegar al nodo de destino. De todas formas, en el proceso es posible obtener rutas que no son las más cortas pero que podrían emplearse para procesos de deflexión de rutas (control de contención). Igualmente, se evidencia que es posible obtener estas rutas ya que al momento de inicializar el algoritmo sobre una herramienta como OMNeT++ orientado a eventos discretos y dada la irregularidad de las topologías (excepto TEST), se encuentra que no todas las hormigas van a encontrar una ruta (s, d) al mismo tiempo de ejecución.

Una sugerencia que se hace en aras de no ocupar memoria con datos que pueden ayudar a saturar el sistema (problema recurrente en OMNeT++ sobre el SO Windows), se refiere a la evaporación de la feromona, esta puede comenzar una vez que una o varias hormigas hayan alcanzado un nodo de destino. Esto se decide al comienzo del proceso, en la mayoría de las implementaciones el proceso de evaporación comienza cuando la primera hormiga alcanza el destino. La ecuación 4.16 muestra la forma como se actualiza la feromona mediante el empleo de una variable de persistencia ρ (este valor puede seleccionarse al principio de la ejecución puede ser generada mediante una función uniforme en OMNeT++ se emplea la función uniform (0,1) y se asigna a ρ).

$$f_{c,l}(t) = \rho * f_{c,l}(t)\ para\ (0 < \rho < 1) \quad (4.16)$$

El valor de ρ se fija dentro de los parámetros del archivo $.ini$ en la herramienta OMNET++ o se inicializa dentro de la función $Initialize\ ()$ en el bloque del módulo ACO. Hasta el momento el algoritmo solo permite determinar cómo se desplazan las hormigas hasta el destino en el par (s, d), aunque no se ha definido la ruta como tal, en cuanto a la asignación de longitudes de onda esta se puede hacer en conjunto con la ruta o por separado buscando la primera que se encuentre disponible como en el caso AG.

En resumen las hormigas buscan una ruta entre s y d una vez la encuentran termina su búsqueda y se puede comprobar que esa ruta no haya sido encontrada anteriormente y de no serlo almacena la ruta encontrada en un conjunto de rutas posibles (espacio de rutas), sobre este espacio de rutas (cuyo valor máximo se establece al comienzo) se puede aplicar una función de aptitud (*fitness*) que muestra numéricamente la bondad de la población encontrada. También puede servir de espacio de búsqueda para aplicar PSO, que como se verá más adelante, permite moverse sobre un espacio de búsqueda para encontrar las mejores soluciones globales.

Igualmente, la función de aptitud integra elementos que permitan disminuir la probabilidad de bloqueo de la red como el número de saltos, distancia entre ellos, número de puertos de salida (*gates*). Para la definición de las funciones de aptitud se procede mediante el cálculo de costos como en el caso de AG se emplean las ecuaciones 4.9 a la 4.13 y se obtienen los costos y las funciones *fitness*. Asimismo se recuerda que los parámetros que se aplican para encontrar dichas funciones de aptitud (denominadas $F1$ y $F2$) se encuentran en la red seleccionada.

Con estos valores de *fitness* se encuentra la aptitud de cada ruta encontrada. Tanto la ruta como su valor *fitness* se almacenan en un vector. Ahora, para seleccionar la ruta con mejor aptitud se puede emplear el mismo método de la ruleta sesgada. Como se recuerda, según las rutas y su valor de aptitud se define el sector de la ruleta y de forma aleatoria se hace rotar la misma (selección aleatoria de un sector), entonces, las rutas con mejor aptitud serán seleccionadas para formar parte de las

mejores soluciones. En este caso se cuenta con un vector de vectores que puede llenarse según el siguiente algoritmo.

$Inicio$
$\quad Ruta\ encontrada\ por\ ACO$
$\quad Si\ tamaño\ de\ vector\ <\ maxRutas$
$\quad\quad Almacenar\ ruta\ en\ vector\ de\ rutas\ cognitivas$
$\quad Sino$
$\quad\quad Almacenar\ ruta\ en\ posición\ pos$
$\quad\quad Pos++$
$\quad Si\ pos\ ==\ maxRutas$
$\quad\quad Pos\ =\ 0$
$\quad Sino$
$\quad\quad Retorna\ inicio$
fin

Nótese que su similitud con el proceso de AG permite una posible conjunción entre ACO y AG, siendo ACO la función que defina no solo la población inicial de rutas para AG sino que la complementa al conseguir rutas locales óptimas que pueden emplearse para evolucionar en AG o como espacio de búsqueda para PSO.

Al usar el mismo procedimiento aplicado a AG para comprobar la cognicion, empleando el ciclo cognitivo se encuentra que el estado de “observación” se lleva a cabo cuando se hace una primera visita a la red con la ayuda de la función *cTopology* (de la herramienta OMNeT++), esta crea una primera base de información sobre las rutas en la red (cualquiera que sea su topología), en seguida se tiene el estado de “orientación” que tiene en cuenta la ruta obtenida luego de aplicar ACO al momento de presentarse un requerimiento por parte de una ráfaga que acaba de ser ensamblada. La tercera etapa del ciclo corresponde a la “planeación” en el cual la información sobre la “mejor ruta” adquiere sentido para el método de control cognitivo.

Es decir, una vez obtenido el vector solución (ruta entre s y d) para un nodo particular de la red, éste es almacenado en un vector de vectores que contendrá un número máximo de rutas con el mismo origen pero destino variable, las cuales formarán

parte de la estrategia cognitiva implementada dentro de la red, este ciclo corresponde al “aprendizaje”. El tamaño de dicho vector de vectores es limitado y se establece como parámetro de diseño. Seguidamente, y gracias a la etapa de “decisión”, el vector de rutas finales correspondiente a un nodo, interactúa con el algoritmo ACO, dentro de la función “Generación de rutas aleatorias” las cuales pueden servir como nuevas colonias C.

Finalmente, se anota que en la literatura existen diferentes representaciones de ACO las cuales difieren entre sí pero al final tienen la misma intención. Igualmente, las pruebas se realizaron sobre la red TEST inicial y sobre la red NSFNeT en su variante 2 (NSFNeT 2).

4.3.4. Empleo de PSO (*Particle Swarm Optimization*) en RWA

En seguida se propone el uso de PSO (Eberhart & Shi 2001) en procesos de enrutamiento y asignación de longitudes de onda en las redes OBS. Se recomienda consultar el Anexo 7 para una mejor comprensión de la técnica PSO de SI (*Swarm Intelligence*).

Sin emabargo, cabe anotar que PSO como otros algoritmos evolutivos, puede ser aplicado en un amplio espectro para resolver problemas de optimización y otros que pueden convertirse en problemas de optimización, entre ellos están: optimización multiobjetivo, calsificacion, reconocimiento de patrones, modelado de sistemas biológicos, palneación de recursos, procesamiento de señales, toma de decisiones, robótica, diseños Fuzzy entre otros.

El algoritmo general para PSO se muestra en la figura 4.35 y su funcionamiento es el siguiente: se comienza con un conjunto inicial de partículas con posiciones y velocidades aleatorias, en seguida se vuelven discretas empleando un operador de atracción o evaluando el *fitness* de cada partícula, se compara el resultado del *fitness* con la partícula actual para obtener *Pbest* (cada partícula se debe actualizar a su mejor posición encontrada), en seguida se compara la evaluación del *fitness* con la población total actual para obtener la *Gbest* (cualquier partícula puede ser actualizada la mejor posición encontrada), se evalúa según las ecuaciones para velocidad y posición (ecuaciones 4.17 y 4.18). Luego se compara con un criterio

determinado y se detiene, en otro caso regresa a la evaluación de la función *fitness* de cada partícula y se continúa hasta lograr la meta.

$$v_i = v_i + rand(\quad) * (P_{best} - x_i) + 2 * rand(\quad) * (G_{best} - x_i) \quad (4.17)$$

$$x_i = x_i + v_i \quad (4.18)$$

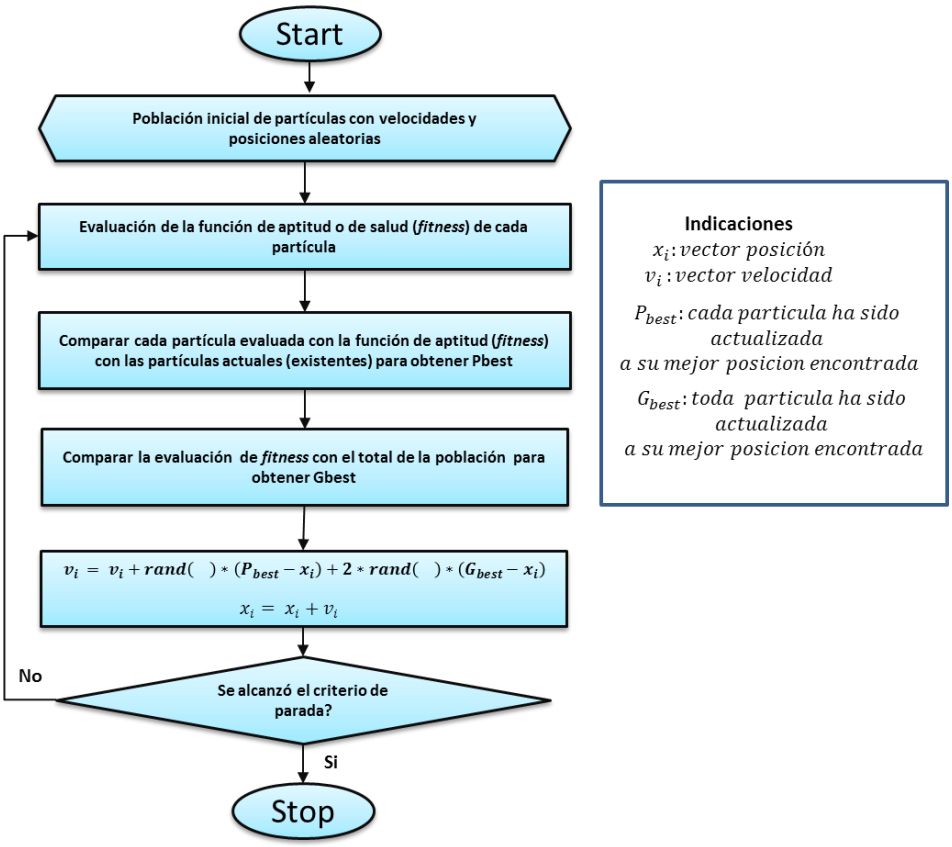


Figura 4.35. Algoritmo general para PSO

Las partículas se mueven a través de un espacio de soluciones y se evalúan de acuerdo al criterio o evaluación del mismo luego de cada ejecución.

En los procesos de implementación de este algoritmo se puede acudir al conjunto de rutas creadas inicialmente por la clase *cTopology* como en los casos anteriores, en este caso el resultado obtenido se toma como el espacio donde se desplazan las partículas. Este método se puede incluir dentro de los métodos de búsqueda local ya que se mueve en un espacio de búsqueda de soluciones completas,igualmente, el

espacio de trabajo de PSO puede ser el conjunto dejado al emplear otra técnica de busuqueda como puede ser ACO, e inclusive el GA, sobre dichos espacios se definen las partículas (velocidad y posición) y se puede emplear para encontrar las rutas óptimas, en esta ocasión se aprovecha su aplicación para clasificar los resultados que tienen mejores opciones de elección como soluciones óptimas, dentro de las redes OBS esta heurística puede ser aplicada tanto para encontrar rutas, como para seleccionar la longitud de onda sobre la ruta o la selección del método de ensamble que mejor se adecua al requerimiento de conexión.

4.3.5. Empleo de ANN (*Artifical Neural Networks*) en el ensamble de ráfagas

El uso de Redes Neuronales Artificiales tiene una amplica cobertura en la literatura cuando se trata de la inclusión de elementos de inteligencia artificial para intentar mejorar procesos. Uno de estos procesos para los cuales las ANN pueden ser empleados es el de selección, se busca que mediante el empleo de estas redes sea posible a partir de una serie de elementos de entrada organizados como un vector, encontrar el método que mejor se aproxime de acuerdo a las entradas presentes. En esta ocasión, se ha elegido a las redes neuronales para definir cuál de los métodos implementados para el ensamble de ráfagas en una red OBS se puede usar de acuerdo con los requerimientos de tráfico de entrada. Para revisar otros aspectos sobre ANN se recomienda la lectura del Apéndice B, sección B.8.

Se parte del modelo general del perceptrón simple como se muestra en la figura 4.35 y se adecua a los requerimientos, como se muestra mas adelante.

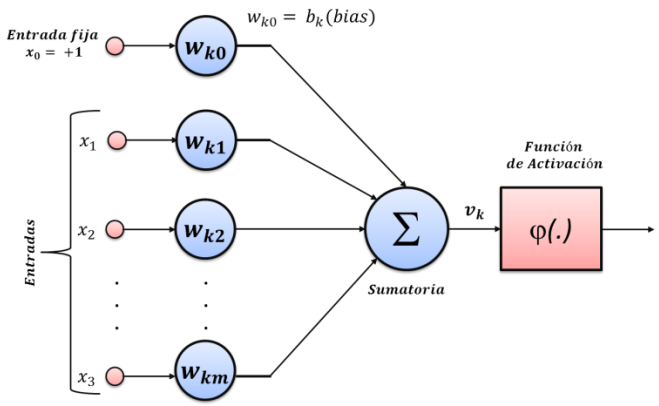


Figura 4.36. Modelo general de perceptrón simple

Se busca que mediante la inclusión de un pequeño módulo cognitivo de prueba se pueda elegir el método de ensamble de ráfaga de acuerdo con un conjunto de elementos de entrada, se busca además que acorde con los conjuntos de entrada, estos se puedan comparar con otros conjuntos ya obtenidos y si son diferentes se puedan almacenar en una base de conocimiento (*Memory Data Base*) que permita en una siguiente iteración saber que método se ensamble se deba elegir.

La ubicación de este módulo es en el *edgeNode* o nodo de frontera, este actúa directamente en el módulo *burstifier*. La figura 4.37 muestra el modelo general de funcionamiento del módulo propuesto.

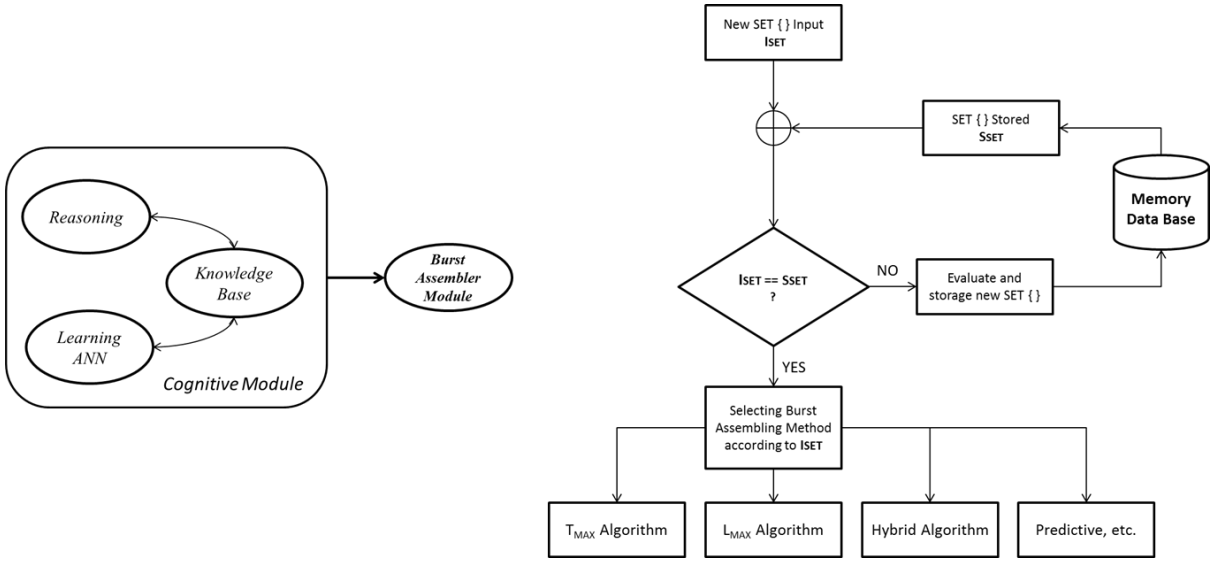


Figura 4.37. Funcionalidad del módulo cognitivo para ensamble

Aunque se trata de un modelo simple inicial, su importancia esta en poder contribuir a encontrar la mejor forma de realizar el proceso de ensamble de ráfagas en OBS distribuida y aprender de modelos pasados almacenados.

Aunque como se observa mas adelante, los resultados pueden ser afinados, el modelo trata de mejorar la propuesta de la técnica mixta empleada en el ensamble o en su defecto este método puede ser seleccionado dependiendo de los valores presenten en la entrada.

El modelo que se sigue es el de síntomas – enfermedad, o síntomas – caso de solución y tratamiento. Al tratar de optimizar el comportamiento del ensamble de ráfagas, surgen otras soluciones a partir del poder predecir el tamaño de la ráfaga, debido que este parámetro es vital para la realización de localización de recursos para las ráfagas. Con el empleo de ANN es posible también conocer ese posible valor de la longitud de la ráfaga antes de ser creada.

4.3.6. Modelo de *Cross Layer* TCP/OBS

4.3.6.1. Consideraciones iniciales

Como se ha expresado anteriormente, se propone la realización de un proceso de interacción entre TCP (cuyo formato de cabecera se observa en la figura 4.38) y OBS, como ya se han definido los modelos de redes OBS es necesario definir los elementos básicos para la definición de un módulo TCP donde sea posible evidenciar el comportamiento de los mecanismos de control de congestión, si se crean fuentes TCP estas deben estar transmitiendo información constantemente y pueden estar desplegando dichos mecanismos, la fuente puede estar en los estados de *slow start, congestion avoidance y fast retransmit/fast recovery*. Como se había mencionado en capítulos previos (Capítulo 2, pp. 191-192), el control de flujo de la fuente se basa en el concepto de ventana deslizante, esta se desplaza con la llegada de los ACK reconociendo paquetes recibidos y permitiendo enviar otros nuevos. El tamaño de la ventana controla el flujo de paquetes instantáneos a transmitir por la fuente, esta varía de acuerdo con la llegada de un ACK, el vencimiento de *timeout* de retransmisión o llegada de ACK duplicados. La ventana de transmisión se adapta a los flujos presentes. Por su parte *Fast recovery* y *fast retransmit* recuperan perdidas de paquetes sin disminuir la tasa de transmisión.

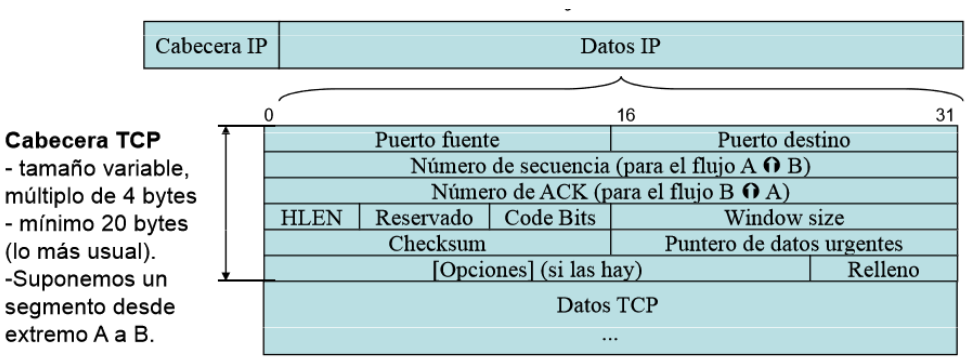


Figura 4.38. Formato PDU TCP

Para lograr este primer modelo se deben crear los algoritmos:

- **Ventana deslizante**. Como TCP es orientado a conexión se requiere que el receptor informe al transmisor de los segmentos que van llegando, esto lo hace

mediante acuses de recibo ACK (bytes reconocidos) se trabaja con un rechazo de tipo selectivo.

- **Retransmisión**. TCP asegura el envío de todos los datos pendientes (o de niveles superiores) por lo tanto debe detectar la perdida de los mismos y retransmitirlos, una forma es a través del control de un temporizador conocido como RTO, al cumplirse este valor si no ha recibido un ACK el retransmite la información (primero de los segmentos enviados pendientes de ACK). El valor del RTO se actualiza por el transmisor de forma permanente según el valor calculado del RTT (*Round Trip Time*), en general se acude a una función que duplica el valor de RTO para el siguiente envío (*backoff*). Para el trabajo con OMNeT++ como no posee mecanismos tradicionales para crear *timers*, se emplea *selfmessages* (mensajes enviados a sí mismo, una vez que llegan indica que se ha cumplido el tiempo, la función empleada se *scheduleAt* () en OMNeT++).

- **Medida de *RTT***. Es un parámetro que depende del nivel de ocupación de la red, el transmisor TCP toma medidas del RTT y después calcula RTO, este algoritmo es un poco más complejo que los anteriores y los parámetros que intervienen en el cálculo son: M: medida del RTT, A: estimador de medida del RTT, D: estimador de desviación del RTT (típico), Err: Diferencia entre la más reciente medida del RTT y el valor de A. Granularidad del reloj para medida (por defecto se fija a 100ms), g: ganancia de cálculo de media (0,125) y h: ganancia del cálculo del estimador de varianza (0,25). Siguiendo las recomendaciones del **RFC 2988**, el proceso es el siguiente:
  Se fija RTO=3 (según la convención tomada).
  Se obtiene M=RTT (temporizador que se pone en marcha al enviar un segmento), M debe ser múltiplo de G entonces $A = M + 0{,}5$; $D = A/2$; $RTO = A + max(4D, G)$.
  Desde el segundo ACK de un mensaje NO reenviado se usan las ecuaciones definitivas para calcular RTO: $Err = M - A$; $A = A + Err; D = D + h(abs(Err) - D)$; $RTO = A + max\ (4 * D, G)$, si este valor es menor a 1 se redondea al valor 1. Al vencerse el *timeout*, se emplea el *backoff* (duplica el RTO). Cuando hay retransmisión se emplea el algoritmo de Karn para saber a cuál retransmisión corresponde el ACK.

- ***Slow start*.** Algoritmo para que el transmisor adapte su tasa de transmisión a la tasa que la red puede aceptar, se basa en el principio de que la tasa de transmisión de segmentos debe ser igual a la tasa en que le llegan los ACK. El algoritmo es el siguiente:

  Parámetros: *cwnd, ssthresh* (umbral de *slow start*); *flightSize* que son los segmentos enviados y no reconocidos; IW: valor inicial de la ventana de congestión. LW: valor de la ventana *cwnd* luego de un *timeout*; SMSS: máximo tamaño del segmento.

  Inicialización: cwnd = IW = 1 (o 2 segmentos máximo); *ssthresh=cwnd.*
  Siempre que cwnd<= *ssthresh* se está en *slow start*.
  Al producirse un *timeout* se aplica el algoritmo para *congestion avoidance*: *cwnd* = 1; *sstthress* = max (FlightSize/2, 2); para los ACK enviados se sugiere que el tamaño de la ventana de recepción sea 2.

- ***Congestion avoidance***. Adapta la tasa de fuente a la de la red; siempre que cwnd > ssthresh se está en *congestion avoidance*. Por cada segmento reconocido cwnd = cwnd + 1/cwnd (si es notación por número de segmentos) o también: cwnd = cwnd + (SMSS)2/*cwnd*, si *cwnd* se implementa como número de bytes. Si se produce un *Timeout* se aplicaría la corrección de parámetros ya conocida: cwnd = LW = 1 segmento. *ssthresh* = max (FlightSize/2, 2 segmentos) Tras realizar estas correcciones la fuente pasaría a *SlowStart* ya que *cwnd* < *ssthresh*.

- ***Fast retransmit***. Es un algoritmo destinado a resolver una situación de pérdida de paquetes sin esperar a que se cumpla el *Timeout*, contando con la colaboración del receptor.

  El algoritmo se basa en el hecho de que la recepción tres o más ACKs idénticos es un indicador de que un segmento se ha perdido, y al mismo tiempo la congestión de la red no es tan grave como para tomar medidas drásticas como en el caso de un *timeout*. El hecho de que se sigan recibiendo ACK es un indicador de que hay paquetes que han abandonado la red llegando a su destino.

El algoritmo consiste en tres acciones, una llevada a cabo en el transmisor y dos en el receptor:

Receptor:
En cuanto se recibe un segmento fuera de orden, es decir que exista un hueco la secuencia de segmentos recibidos antes que él, se debe enviar inmediatamente un ACK duplicado, que reconozca el último segmento recibido correctamente.

En cuanto se reciba el segmento que cubre el hueco dejado, se debe enviar inmediatamente un ACK reconociendo hasta el último segmento recibido correctamente.

- **Transmisor**:
  Estando en CA ó SS, si se reciben 3 ACKs replicados, es decir que reconocen un mismo segmento ya confirmado, se retransmite inmediatamente el segmento siguiente al que reconocen los ACKs replicados.
- Normalmente *Fast Retransmit* se implementa conjuntamente con *Fast Recovery*, dando lugar a la implementación Reno de TCP. En ese caso el transmisor entra en *Fast Retransmit / Fast Recovery*.

- ***Fast recovery***. Al entrar en *Fast Retransmit / Fast Recovery*, con la recepción de tres ACKs, se retransmite el paquete perdido, como indica *Fast Retransmit*, y se llevan a cabo las siguientes acciones:

- 1º Se asigna a *ssthresh* el valor determinado por *Congestion Avoidance*: $ssthresh = max\,(FlightSize/2\,, 2\,segmentos)$
- 2º después de retransmitir el paquete (*Fast Retransmit*), se asigna a *cwnd* el siguiente valor: $cwnd = ssthresh + 3 * SMSS$.
- 3º Cada vez que se recibe otro ACK duplicado, se incrementa *cwnd* un segmento, y si el valor de *cwnd* lo permite, se transmite un nuevo segmento (cada vez que llegue un ACK duplicado deberá disminuir el valor de *FlightSize*).
- 4º En el momento en que llegue el primer ACK no duplicado se asigna a *cwnd* el valor de *ssthresh* obtenido en el punto 1º. En este momento se ha entrado en *Congestion Avoidance*, ya que se esta reduciendo a la mitad la tasa a la que se

estaba transmitiendo en el momento en que se produjo la pérdida del paquete. En el siguiente diagrama se observa un ejemplo de *Fast Retransmit / Fast Recovery.*

4.3.6.2. Características del modelo se Simulación y el simulador en OMNeT++

El simulador estará compuesto por los siguientes módulos:

TCPIP: Módulo simple que actúa como fuente TCP/IP. Se explicará con más detalle en el siguiente apartado.

Router: Módulo simple que actúa como multiplexor de diversas fuentes TCP/IP. Dispone de un vector de puertas de entrada y un vector de puertas de salida, con las que se conecta a cada módulo simple TCPIP, y una puerta de salida y otra de entrada que se conectarán a través de sendos enlaces al módulo *NodoDestino*.
Sus funciones son:

- Recibir los paquetes TCP/IP procedentes de los módulos TCPIP, almacenarlos en una cola finita FIFO, y reenviarlos por el enlace de salida hacia el módulo *NodoDestino*. El *buffer* del Router tendrá una capacidad limitada en bytes, no en paquetes, ya que el tamaño de éstos puede variar.
- En el otro sentido de la comunicación actúa como demultiplexor: recibe los ACK's procedentes de *NodoDestino* y los encamina por el enlace adecuado (en función de la información de cabecera del paquete ACK).

NodoDestino: Módulo compuesto que consiste en un módulo Router conectado a tantos módulos simples Sink como módulos TCPIP tenga el sistema. El Router actúa como demultiplexor de la información procedente de las fuentes TCPIP y como multiplexor de los ACK's generados en cada módulo Sink.

Sink: Módulo simple cuyo cometido es generar los ACK's para los paquetes que recibe del otro extremo, un módulo TCPIP. Debe haber un módulo TCPIP por cada módulo Sink (el nombre se toma acorde con la herramienta OMNeT++ por convención).

Primero se hace una prueba de este módulo sin OBS y posteriormente el escenario de prueba se muestra en la figura 4.39 para su interacción con OBS, se recuerda que en principio se espera que la operación de la red OBS no afecte la operación del módulo TCP. En el Apéndice J se encuentran otros detalles de implementación del módulo TCP (Reno).

4.3.6.3. Medidas a realizar

- **Variables del protocolo**

En la herramienta OMNeT++ se define un objeto del tipo tipo *cOutVector*, que permite observar la evolución de los siguientes parámetros del protocolo en tiempo de simulación:

- *cwnd*
- Ssthresh
- RTO

- **Parámetros de rendimiento**

1. *Thoughput* de cada fuente:
   - *Throughput* en bps instantáneo de cada fuente: Deberá elegir un intervalo de medida para promediar.
     Será necesario que defina un objeto de tipo *cOutVector*, que le permita ver la evolución del *throughput* en tiempo de simulación.
   - *Throughput* medio en bps por fuente.

2. Tasa de paquetes perdidos: (IPLR: *IP Packet Loss Ratio*):

$$\frac{Numero\ de\ paquetes\ perdidos}{numero\ de\ paquetes\ transmitidos}$$

3. Retardo de los paquetes: (IPTD: IP *Packet Transfer Delay*): Se define como el tiempo transcurrido para cada paquete desde el momento en que comienza su transmisión hasta el momento que finaliza su recepción.

- IPTD medio.
- Estimación de la función de distribución de IPTD mediante la definición de un objeto *cDoubleHistogram* que puede obtenerse en OMNeT++.

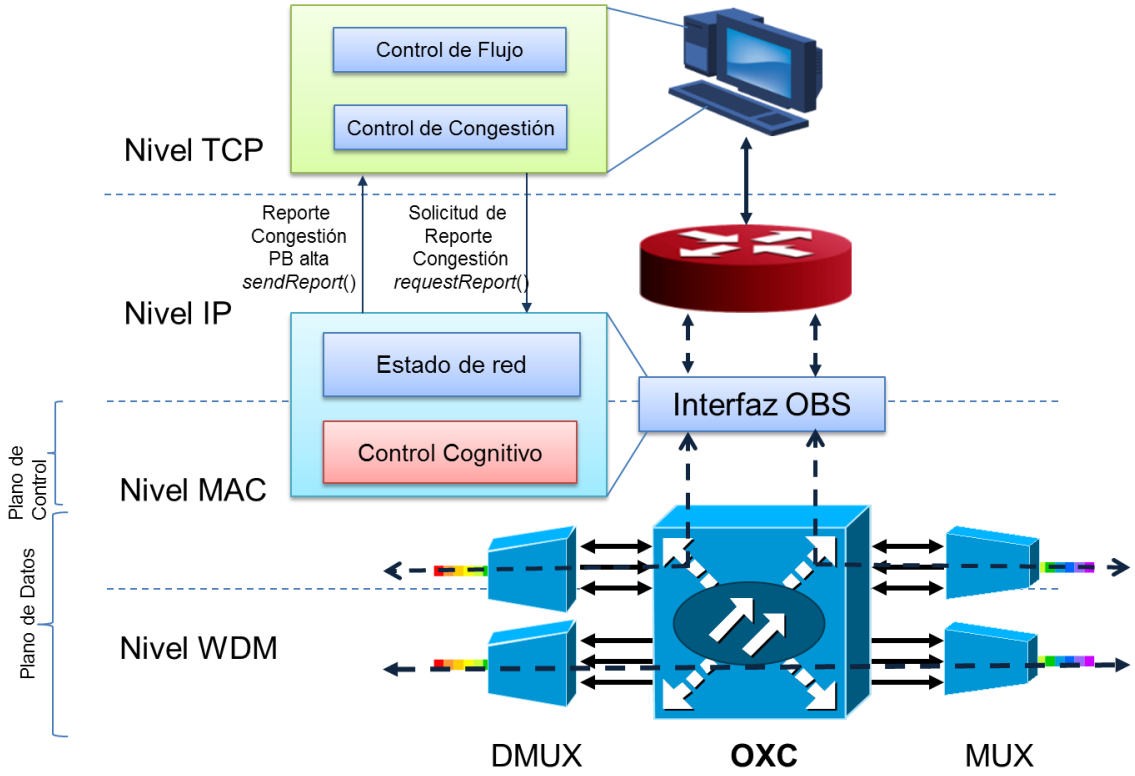


Figura 4.39. Modelo *Cross Layer* TCP/OBS

- **Escenario de Referencia**

En la siguiente sección se muestran algunos de los escenarios de prueba, donde se modelan situaciones de congestión de red y respuesta de la red OBS ante diferentes requerimientos de TCP. Los parámetros que definen cada escenario son valores que deben poder variarse desde el archivo $omnetpp.ini$.

En el proceso de interacción entre TCP y OBS se hace implementar en el nodo de borde un sub módulo que maneja en principio información local del estado del nodo.

4.4. Definición de escenarios de pruebas

4.4.1. Ambientación

Una vez se cuenta con los modelos lógicos y físicos de la red OBS y con las propuestas de los métodos cognitivos, se pueden obtener un conjunto de escenarios de prueba a los cuales se les pueden ajustar y modificar los parámetros de cada modelo físico. Asimismo, con la prueba de diferentes escenarios sobre redes OBS con y sin meta heurísticas con y sin cognición, con y sin interacción TCP/IP sobre OBS se comprueba que es posible mejorar el desempeño de dichas redes en cuanto a la probabilidad de bloqueo de ráfaga y la disminución de retardos.

Luego de analizar diferentes combinaciones se define un amplio espacio de posibilidades de escenarios de prueba, se comienza con una red OBS ajustada para trabajar con parámetros típicos y métodos de ensamble de ráfagas y RWA básicos, por ejemplo se trabaja con unos valores de T y B ajustados y con el método *Shortest Path First Fit* para enrutamiento, tomando la longitud de onda que primero este desocupada, posteriomente se acondiciona un nuevo modelo de red OBS con meta heurísticas y luego se incluye la cognicion o el elemento cognitivo desarrollado. En seguida se hace una listado de referencia de los mismos. Se recuerda que el diseño orientado a nodos permite probar un nodo funcionalmente y posteriormente se instancia el mismo para ensamblar la totalidad de la red OBS.

4.4.2. Modelos de comportamiento o de desempeño:

- **Modelo básico de red OBS (no incluye metaheuristicas ni cognición)**:

- Diseño orientado a nodos:
  Empleo de Fuentes tipo Poisson.
  Diseño de los nodos de borde o frontera (*edgeNodes*).
  Funcionalidad RWA.
  Diseño de los nodos centrales (*coreNodes*).

- **Modelo de red OBS (incluye meta heurísticas):**

- Diseño orientad a nodos:
  Empleo de Fuentes tipo Poisson.

Diseño de los nodos de borde o frontera (*edgeNodes*).
Funcionalidad RWA + Meta heurísticas.
Diseño de los nodos centrales (*coreNodes*).

- **Modelo de red OBS (incluye meta heurísticas + cognición):**
- Diseño orientad a nodos:
  Empleo de Fuentes tipo Poisson.
  Diseño de los nodos de borde o frontera (*edgeNodes*).
  Funcionalidad RWA + Meta heurísticas + Cognición.
  Diseño de los nodos centrales (*coreNodes*).

- **Modelo orientado a diseño *Cross Layer*:**
- Modelo General CL TCP/OBS.
- Modelo General (CL + Cognición) TCP/OBS.

Cada uno de los escenarios propuestos se debe representar mediante modelos de simulación en OMNeT++ (según la metodología propuesta) para su correspondiente simulación, utilizando para ello las diferentes topologías de red como son TEST, NSFNeT, EON y GEANT definidas en la sección 4.2.4. Igualmente, cuando se trabaja puntualmente sobre una topología se obtienen versiones de cada una, por ejemplo en el caso de NSFNeT se realizaron pruebas con NSFNeT1, NSFNeT2 y NSFNeT3, respectivamente. Debido a lo anterior se obtiene una amplia base de modelos de simulación. Los modelos se diferencian unos de otros en la variación de algunos parámetros que una vez se ajustan, generan un nuevo modelo de red.

En esta Tesis se busca primero afinar un nodo de red, instanciarlo para obtener los modelos de red OBS (sección 4.2.4) y luego se introducen los métodos cognitivos y la interacción con TCP. Se probaron diferentes escenarios y se incluyen muestras significativas de cada uno. Igualmente, se recuerda que se trabaja con nodos hibridos (*edgeCore*) ubicados en cada ciudad.

En seguida se hace un resumen de algunos parámetros de configuración de red para OBS, en algunos se hace necesario realizar pruebas sobre la red para obtener los valores de trabajo que logran un mejor comportamiento de las redes OBS de

prueba. La toma de los parámetros es particular para cada escenario de simulación lo que permite obtener diversas configuraciones de prueba.}

- Tiempo de procesamiento del conversor óptico-eléctrico: es el tiempo que la cabecera tarda en realizar el procesamiento O-E dentro del módulo de control lógico (Klinkowsky 2007).

- Tiempo de procesamiento del conversor eléctrico: hace referencia al tiempo que la cabecera tarda en realizar el procesamiento E-O dentro del módulo de control lógico (Klinkowsky 2007).

- Tiempo de procesamiento del BCP: es el tiempo que tarda la cabecera de la ráfaga en procesar la información que transporta por cada nodo recorrido.

- *Offset*: definido como el retardo entre el BCP y la ráfaga. Éste debe ser calculado teniendo en cuenta los retardos de procesamiento correspondientes a los conversores óptico-eléctrico y eléctrico-óptico, el máximo número de nodos que una ráfaga puede atravesar a lo largo de la red y el retardo de procesamiento del BCP. En este sentido, el tiempo de *offset* crecerá a medida que la ráfaga tenga que atravesar una mayor cantidad de nodos, ya que los retardos mencionados anteriormente se acumulan por cada nodo intermedio correspondiente al camino de la ráfaga (Garg 2012).

  Un ejemplo del cálculo del offset para una red NSFNeT, teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, se sabe que la red analizada posee 14 nodos; ahora bien, se ha encontrado que el mayor número de saltos que podría recorrer una ráfaga entre origen y destino (buscando las distancias más cortas) es seis (6). Por lo tanto, el *offset* máximo se obtiene sumando los tiempos de procesamiento y multiplicándolos por el número de nodos que en el peor de los casos, debe recorrer la ráfaga (en este caso, este número corresponde a 6). De esta forma, los resultados de la operación se muestran a continuación:

$$maxOffset = (((1\mu s)x2) + 10\mu s)x6$$

$$maxOffset = 72\mu s$$

El procedimiento para hallar el *offset* mínimo, parte del camino más corto que una ráfaga tendría que recorrer para llegar a su destino, esta ruta corresponde a dos nodos adyacentes. Por otra parte, sabiendo que por nodo existen tres tipos de retardo, uno debido al procesamiento del BCP y los demás, producto de la conversión O-E y E-O, las operaciones para calcular este offset son:

$$minOffset = (((1\mu s)x2) + 10\mu s)x2$$

$$minOffset = 24\mu s$$

Se configuran además otros parámetros como: el tamaño mínimo que una ráfaga debe tener (“minSizePadding”), el tamaño de su cabecera (“tamHeader”), el de la cabecera adicionada a cada paquete dentro de la ráfaga y el del BCP; (“tamHeaderPacket”), la opción de adicionar o no el último paquete entrante antes de ensamblar la ráfaga, los criterios para llenar la cola de ráfagas y para el número de ráfagas programadas, y por último el tiempo de guarda definido como el offset entre transmisiones consecutivas de ráfagas.

Se tienen en cuenta las longitudes de onda entre nodos de borde y nodos centrales. Como ejemplo se toman las siguientes configuraciones:

NSFNeT1: posee dos (2) longitudes de onda entre módulos frontera y cuatro longitudes de onda entre los módulos centrales.

NSFNeT2: presenta ocho (8) longitudes de onda entre módulos frontera y ocho longitudes de onda entre los módulos centrales.

NSFNeT3: tiene diez y seis (16) longitudes de onda entre módulos frontera y diez y seis (16) longitudes de onda entre los módulos centrales.

Igualmente se puede obtener para TEST, GEANT2 y EON, para el caso GEANT los valores de *offset* varian al tener un mayor número de nodos, igual para EON pero menor para TEST.

- Velocidad de transmisión: hace referencia a la velocidad con la cual las ráfagas atraviesan la fibra óptica y viajan a través de los nodos de la red. Teniendo en cuenta los trabajos relacionados, en la mayoría de los casos, las longitudes de onda soportan una velocidad de 2,5, 10 o 100Gbps. A manera de ejemplo, la red óptica europea, GEANT2, opera a 10Gbps (Garg 2012; Gond & Goel 2010; Chaing *et al.* 2007).

Los parámetros para determinar los criterios de ensamble son tres: el primero, denominado “maxTime”, indica que una ráfaga puede ser ensamblada, una vez se cumpla un tiempo máximo; “maxSize” establece que una ráfaga se ensambla si los paquetes agrupados cumplen con el tamaño asignado; por último, se encuentra el ensamble por paquetes o “numPackets”, el cual permite formar una ráfaga si al menos tres paquetes presentan igual destino y prioridad.

En la Tabla 4.3b) se presenta una muestra de los parámetros tomados de los modelos de simulación, con ello se busca dar una idea de las variables de simulación empleados para las redes OBS.

4.5. Plan de Pruebas

4.5.1. Consideraciones previas

- En las redes OBS/WDM las ráfagas representan la unidad básica de transporte, sin embargo, la pérdida de una ráfaga implica la eliminación de numerosos paquetes o de gran cantidad de información. Los resultados obtenidos en principio se refieren a ráfagas pérdidas, recibidas o programadas.

- Al comenzar cada proceso de simulación de las diferente redes analizadas, éstas almacenan datos paulatinamente, atravesando régimen transitorio. En este tiempo los paquetes y las ráfagas no alcanzan a completar la capacidad de la red, por lo tanto, los datos obtenidos en este lapso de tiempo no serán completamente confiables para analizar la probabilidad de bloqueo. El siguiente periodo corresponde al régimen permanente *steady state*, lapso en el cual se recomienda realizar la toma de datos y el análisis de estadísticas.

Parámetro	Nombre de la variable en OMNeT++	Fijo	Variable	Parámetro de la red OBS	Parámetro meta heurístico	Parámetro del método de control cognitivo	Valores o intervalos
Funciones de distribución (i.e. exponencial)	$sendIaTime$	✓		✓			32 µs
Longitud del paquete	$packetLength$	✓		✓			1472 Bytes (ajustado)
Archivo de reglas	$rulesFile$	✓		✓			14 reglas (red NSFNeT)
Tiempo de procesamiento de conversor OE y EO	$OEConversionDelay$ $EOConversionDelay$	✓		✓			1 µs
Tiempo de procesamiento del BCP	$BCPProcessingDelay$	✓		✓			10 µs
Tiempo *offset*	$minOffset$ $maxOffset$		✓	✓			20 – 72 µs 20 – 42 µs 20 – 32 µs
# Longitudes de onda	$lambdasCore$		✓	✓			4 λ 8 λ 16 λ
Velocidad de transmisión	$dataRate$		✓	✓			2,5 Gbps 10 Gbps
Población Inicial (para meta heurísticas)	$numRutas$		✓		✓		4 Rutas 5 Rutas 6 Rutas
Número de Generaciones (Para GA)	$numGeneraciones$		✓		✓		1 Generación 2 Generaciones 3 Generaciones
Vector cognitivo de rutas	$maxCognitive$	✓				✓	4 Rutas
Número de *Burstifiers*	$numBurstifiers$	✓		✓			42 Burstifiers (red NSFNeT)
Tamaño mínimo permitido de la ráfaga	$minSizePadding$	✓		✓			8 Bytes
Tamáño de la cabecera de la ráfaga en el módulo *Burstifier*	$tamHeader$	✓		✓			8 Bytes
Tamaño de la cabecera de cada paquete en la ráfaga en el módulo *Burstifier*	$tamHeaderPacket$	✓		✓			1 Byte (red inicial de prueba)
Tamaño de la cabecera de la ráfaga en el módulo *Sender*	$BCPSize$	✓		✓			16 Bytes
Máximo número de bits en la cola del módulo *Sender*	$maxSchedBurstSize$	✓		✓			Sin límite (debido a la herramient

							a)
Máximo número de ráfagas permitidas en la cola del módulo *Sender*	$maxSchedBurstElems$	✓		✓			Sin límite (debido a la herramienta)
Tiempo de Guarda	$guardTime$	✓		✓			1 ns

Tabla 4.4b). Resumen muestra de parámetros empleados para simulación en OBS

- Finalmente se presenta un último estado transitorio, donde para envío de paquetes; se genera entonces la siguiente situación: los datos sobre las ráfagas que ya han sido registradas y que están circulando por la red deben seguir su curso llegando al módulo de destino o perdiéndose en el camino; no obstante, esto debe realizarse sin que ocurra un disminución en los paquetes y ráfagas que se encuentran actualmente en formación, ya que se utilizan como tráfico actual circundante permitiendo obtener datos fiables de probabilidad de bloqueo. La Figura 4.40, muestra los periodos de tiempo analizados anteriormente.

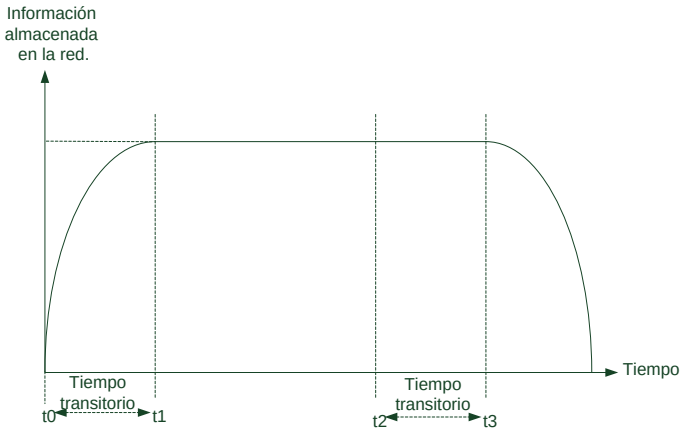


Figura 4.40. Estado de tiempos de la red (Graña 2005)

- **Tiempos de simulación**: las estimaciones de los periodos de tiempo evaluados en las redes se realizan teniendo en cuenta que la función exponencial de 32µs implementada, genera un tiempo de simulación inicial de 11.3 µs. Se toman muestras en los tiempos mostrados en la interfaz de usuario gráfica de OMNeT++ de 0.002s, 0.004s y 0.006s obtenidos después de una, dos y tres horas respectivamente, en los cuales la red presenta un comportamiento estable.

- **Prueba de probabilidad de bloqueo**: permite obtener la probabilidad de bloqueo de las ráfagas en la red OBS/WDM por medio de la ecuación (Gond & Goel 2010).

$$Pb = \frac{Número\ de\ ráfagas\ perdidas}{Número\ de\ ráfagas\ totales} \quad (4.14)$$

En el modelo de simulación obtenido en OMNeT++ el número de ráfagas perdidas y ráfagas totales se obtiene en el módulo "*coreControlLogic*" del nodo central, dicho proceso se lleva a cabo mediante contadores implementados en el código que se pueden visualizar gracias a la función *watch* (método que permite visualizar las variables dentro de la interfaz gráfica de usuario).

- **Prueba de tiempo de procesamiento**: hace referencia al tiempo que toma la red para la generación de una ruta, este factor se evalúa variando algunos parámetros de la red como el número de generaciones y población inicial del algoritmo.

  En la figura 4.41 se muestra la ventana sobre la cual se realiza el análisis del tiempo de procesamiento al aplicar AG con y sin métodos de control cognitivo. El tiempo es tomado desde el módulo "*Sender*" en el momento en el cual se ha establecido una ruta; se toman muestras para diferentes números de ráfagas en la ruta específica y se realizan las respectivas comparaciones.

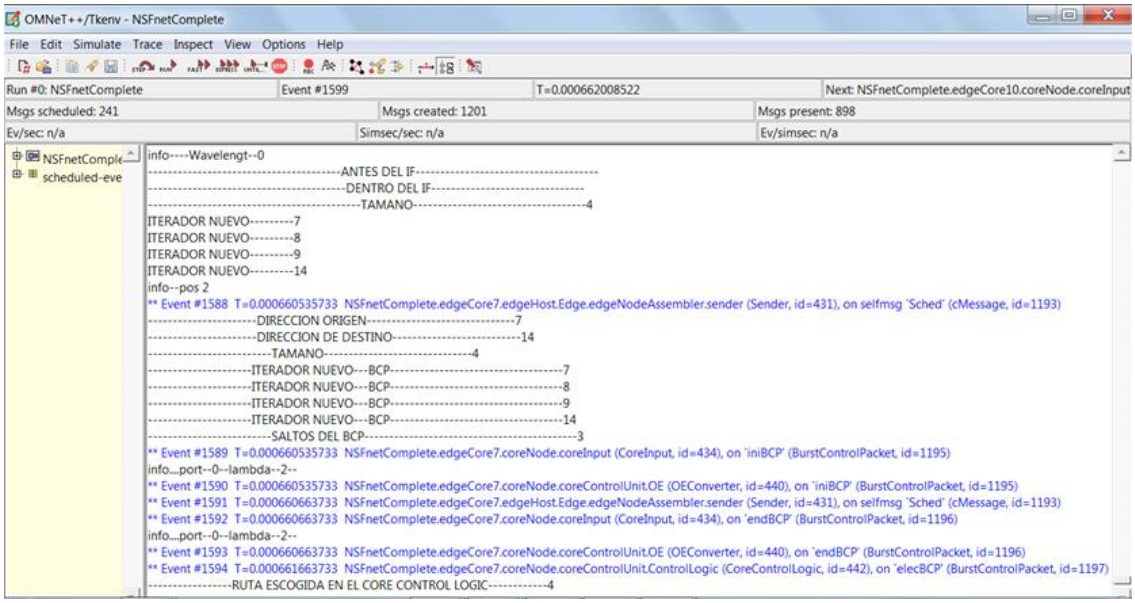


Figura 4.41. Muestra de la Interfaz gráfica de usuario *TKenv* para el análisis del tiempo de procesamiento

- Otro criterio importante de evaluación es la relación de los resultados con procesos de probabilidad provenientes de la implementación del algoritmo genético y el método de control cognitivo aplicado a la red óptica OBS. Esto implica que las muestras tomadas para realizar la evaluación de resultados, deben formar parte de una población y se analizarán como conjunto para obtener el valor medio de probabilidad de bloqueo y tiempo de procesamiento originado por los procesos para el RWA.

  Para generar datos confiables se recurre a la teoría de la estimación[45]. Después de realizar un análisis de los métodos de estimación, se selecciona el Método Estimador de Máxima Verosimilitud (Verdín 2005) el cual presenta las siguientes características:

  - El parámetro al que se le quiere hallar el valor esperado puede ser determinista o aleatorio.

  - Se estima que exista una función de densidad de probabilidad[46] dependiente del parámetro evaluado.

  - Se debe conocer un conjunto de parámetros cuyo comportamiento se estima al modelar los datos de forma probabilística gracias a la función de densidad aproximada.

  - El estimador de máxima verosimilitud permite obtener un valor esperado del parámetro analizado que dependa de los datos conocidos.

  - Conociendo los datos del parámetro y su comportamiento, es posible acercarse a la máxima verosimilitud del parámetro generando la distribución con la que los datos son más probables.

[45] Definida como la rama de la estadística que estudia las técnicas usadas para proporcionar un valor aproximado a un parámetro o variable a partir de datos empíricos o medidas (Álvarez 2007; Box *et al.* 2008).

[46] Función de densidad de probabilidad: La distribución de probabilidad de una variable aleatoria discreta se presenta como la lista de los distintos valores xi que puede tomar la variable aleatoria X, junto con sus probabilidades asociadas $f(xi) = P(X = xi)$, esto es, el conjunto de parejas $\{xi, f(xi)\}$. http://www.sites.upiicsa.ipn.mx/polilibros/portal/Polilibros/P_terminados/Probabilidad/doc/Unidad%202/2.4.HTM.

En este caso, los parámetros hacen referencia a los valores de probabilidad de bloqueo y tiempo de respuesta obtenidos como resultado al analizar el comportamiento de la red usando algoritmos genéticos con y sin método de control cognitivo.

Por criterios de diseño y para disminuir la complejidad de los procesos realizados, la función de densidad de probabilidad que siguen los datos se puede analizar individualmente para cada muestra tomada, sin embargo, las gráficas de estos resultados no son expuestos en el trabajo de grado ya que el tamaño de las muestras es muy alto (Álvarez 2007).

En la estimación del número de parámetros a evaluar. Para cada caso se recurrió a un modelo experimental en cuyo proceso se tomaron N muestras, deseando obtener un margen de error del 15%. El resultado del proceso anterior indica que se requieren 20 muestras para el análisis de la probabilidad de bloqueo y 10 muestras para generar los resultados del tiempo de procesamiento.

Finalmente, para revisar los escenarios de simulación en OMNeT++ se recomienda consultar el Apéndice F, donde se describe la herramienta y se incluyen los modulos básicos en .NED, C++, .h, .ini, msg. Igualmente, en el Anexo11 se incluye una muestra de los algoritmos para OBS en la construcción de los modulos, los planes de prueba se conceiben como entradas y salidas (INPUTS y OUTPUTS). Como se recuerda OMNeT++ no posee modulos para OBS, pero tiene un conjunto de ejemplos a partir de los cuales se pueden construir los bloques básicos para ser posteriormente adaptados a las necesidades que se requieren para obtener los resultados, los procesos requieren por lo general de muchas horas de simulación y procesos de ajustes de parámetros constantemente lo que puede consumir mucho tiempo y recursos.

Las pruebas se realizaron en equipos con SO Windows™, se destaca que en general OMNeT++ se ha probado principalmente sobre Linux, lo que implicó analiza el comportamiento de la herramienta de simulación en las diferentes versiones de Windows™ empleadas.

- Los resultados de las pruebas de tiempo de procesamiento se encuentran condicionados a las características de los equipos en donde se ejecutan los modelos de red. En este caso, para realizar el plan de pruebas se emplearon 3 equipos cuyas especificaciones generales se muestran en la tabla 4.4.

Especificaciones Técnicas	Equipo 1 (NB noteBook)	Equipo 2(DT deskTop)	Equipo 4(NB noteBook)
Microprocesador	Intel CORE i5 2.10 GHz	Intel CORE i3 2.20 GHz	Intel CORE i5 1.7 GHz
Memoria RAM	8 GB	6 GB	12 GB
Almacenamiento Disco Duro	500 GB	700 GB	1000 GB
Sistema Operativo	64 bits, Windows 7	64 bits, Windows 8	64 bits, Windows 8.1

Tabla 4.5. Especificaciones Técnicas de los equipos empleados para las pruebas de los dos modelos de red

El siguiente análisis corresponde al desarrollo del GA para OBS con y sin cognicion, sobre el modelo de red NSFNeT1 un análisis similar se realizan para los otros métodos propuestos, sin embargo el grado de detalle incluido no es el mismo para cada uno no es el mismo.

4.5.2. Análisis de resultados sobre el desempeño del RWA para redes ópticas OBS basadas en GA con y sin métodos de control cognitivo

Después de analizar los parámetros propuestos para simular de forma adecuada la red OBS, el algoritmo genético y el método de control cognitivo, la tabla 4.5 permite visualizar las características que se mantendrán fijas a lo largo de las simulaciones, ya que la modificación de alguna de ellas, o bien, no incide de manera considerable en el desempeño, o no es posible realizar suficientes pruebas debido al tiempo que demandan dichos procesos, dejando el cambio de algunos de estos parámetros como trabajo futuro.

Parámetros	Características
Función exponencial	EXP(32μs)
Longitud de los paquetes	1472 bytes
Archivo de reglas	42 reglas (en principio)
Tiempo de procesamiento en conversores EO y OE	1μs
Tiempo de procesamiento del BCP	10μs
Retardo de propagación	0,2ms
Vector cognitivo de rutas	4 rutas (inicialmente)
Intervalo de confianza	Entre 85 y 95%

Tabla 4.6. Características fijas en las redes del modelo de simulación

4.5.3. Escenarios de simulación para el análisis de la probabilidad de bloqueo en redes OBS con GA con y sin métodos de control cognitivo

En seguida se muestran los resultados de las pruebas realizadas en NSFNeT variando diferentes parámetros como el tiempo *offset*, número de generaciones, longitudes de onda, velocidad de transmisión, entre otros. Entonces primero se define el parámetros base, luego se crea una tabla con los parámetros de configuración y posteriormente luego del análisis estadístico de datos se realiza una representación gráfica en Excell™ de los resultados.

4.5.3.1. Variación de tiempo *offset*

El primer escenario considerado, tiene en cuenta la variación del tiempo *offset* máximo, empezando con el intervalo comprendido entre 20-72μs, seguido por 20-42μs y finalmente 20-32μs; para cada rango se realizan numerosas pruebas en las que se generan los valores correspondientes al número de ráfagas perdidas, programadas y recibidas en los periodos de tiempo mencionados en el ítem anterior. Los resultados de este proceso permiten obtener la probabilidad de bloqueo para cada tiempo analizado.

Las características establecidas para la primera prueba se muestran en la tabla 4.6.

Parámetros	Características
Velocidad de transmisión	2.5Gbps.
Número de Generaciones del AG	1 Generación
Población inicial del AG	6 rutas
Longitudes de Onda	Según NSFNeT 1

Tabla 4.7. Características establecidas en la primera prueba

En las figuras siguientes 4.42, 4.43, 4.44 y 4.45, se realiza la comparación de las ráfagas recibidas, programadas, perdidas, y la probabilidad de bloqueo entre las redes ópticas OBS sin meta heurísticas y las basadas en algoritmos genéticos con y sin cognición.

- **Intervalo de tiempo *offset* desde 20μs a 72 μs**

EXP=(32μs) Población inicial 6 rutas. *offset* máximo 72 μs	**Probabilidad de bloqueo sin AG**	**Probabilidad de bloqueo para AG (BP AG)**	**Probabilidad de bloqueo para AG con cognición (BP AG+COG)**
0.002s	0,016826	0.013398	0.00904438
0.004s	0,01767	0.016826	0.01601
0.006s	0,02129	0.01834	0.01888

Tabla 4.8. Probabilidad de bloqueo con *offset* máximo de 72 μs

La figura 4.42 muestra que para dos de los tres tiempos analizados la probabilidad de bloqueo correspondiente a la red sin mecanismos heurísticos y el algoritmo genético y con control cognitivo. Aunque para el caso sin AG se muestra en principio una respuesta similar para el segundo valor de tiempo, en la medida que transcurre el tiempo los mecanismos cognitivos muestran una mejoría. Mostrando finalmente que para dos (2) de los tres (3) tiempos analizados la probabilidad de bloqueo correspondiente al AG + Cognición presenta una ligera ventaja sobre los dos escenarios anteriores.

En esta grafica se puede observar el comportamiento de los modelos típicos para RWA empleados en OBS sin meta heurísticas y sin Cognicion, se evidencia que bajo las mismas condiciones de red, GA y GA+Cognicion tienen un mejor comportamiento que el método clásico de RWA.

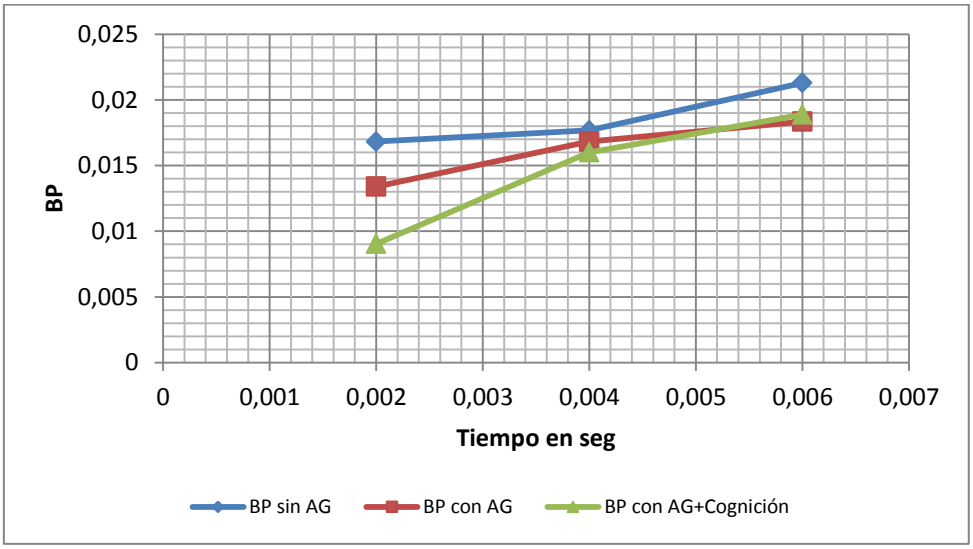


Figura 4.42. Probabilidad de bloqueo con *offset* máximo de 72 μs

- **Intervalo de tiempo *offset* desde 20 μs a 42 μs**

EXP=(32 μs) Población inicial 6 rutas Offset máximo 42 μs	Probabilidad de bloqueo para AG (BP AG)	Probabilidad de bloqueo para AG con cognición (PB AG+COG)
0.002s	0.0593	0.05894
0.004s	0.07066	0.0661
0.006s	0.06966	0.0666

Tabla 4.9. Probabilidad de bloqueo con un *offset* máximo de 42 μs

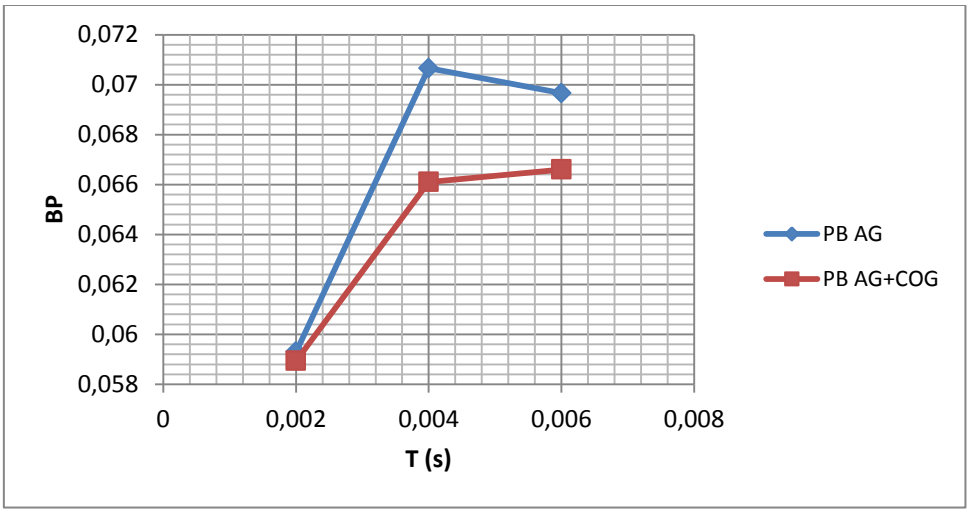


Figura 4.43. Probabilidad de bloqueo con *offset* máximo de 42 $\boldsymbol{\mu s}$

- **Intervalo de tiempo *offset* desde 20 μs a 32 μs**

EXP=(32 μs) Población inicial 6 rutas Offset máximo 32 μs	Probabilidad de bloqueo para AG (BP AG)	Probabilidad de bloqueo para AG con cognición (PB AG+COG)
0.002s	0.1342	0.1276
0.004s	0.13364	0.12998
0.006s	0.13136	0.13084

Tabla 4.10. Probabilidad de bloqueo con *offset* máximo de 32 μs

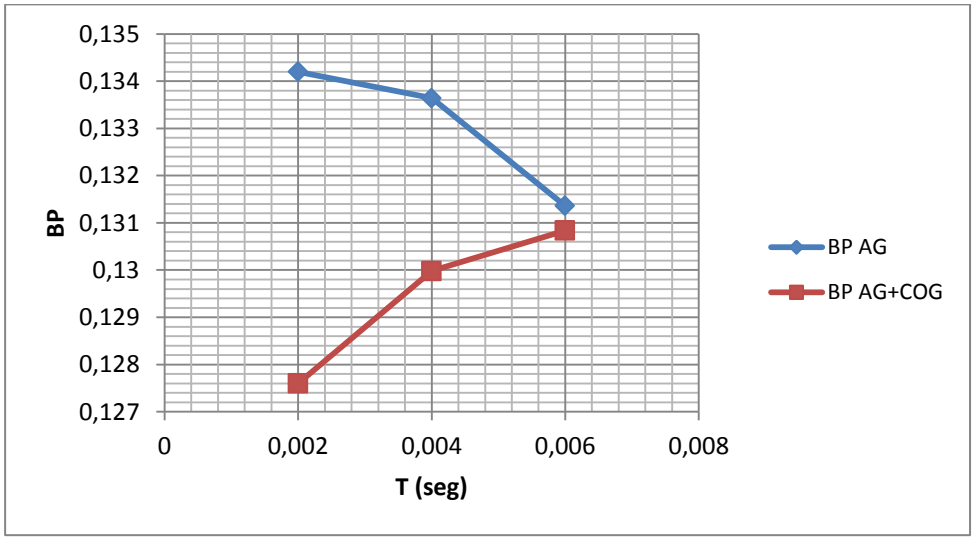


Figura 4.44. Probabilidad de bloqueo con *offset* máximo de 32 μs

En este caso se toman valores de tiempos de *offset* bajos, los cuales como se puede suponer no permiten que para distancias largas las rutas se establezcan adecuadamente, al adicionar cognicion la situacion desmejora, se requiere de un tiempo adicional para procesar tanto AG como Cognición, sin embargo en comparaciones hechas en el modelo de red sin AG y sin Cognicion, los resultados obtenidos son inferiores. Esto implica que de todas formas con AG y con AG+COG, se mejoran los metodos tradicionales, sin embargo se evidencia que la tendencia es a desmejorar al incluir metodos con cognicion, este aspecto conlleva a realizer ulteriores prubas de comprobacion para mayores valores de *offset*.

En seguida, a manera de comparación es posible observar la BP para la red OBS NSFNeT 1 para diferentes valores de tiempo *offset*.

EXP=(0.000032s)	Probabilidad de bloqueo de la red con AG (PB AG 72 μs)	Probabilidad de bloqueo de la red con AG (PBAG 42 μs)	Probabilidad de bloqueo de la red con AG (PBAG 32 μs)
0.002s	0.013398	0.0593	0.1342
0.004s	0.016826	0.07066	0.13364
0.006s	0.01834	0.06966	0.13136

Tabla 4.11. Probabilidad de bloqueo de la red usando algoritmos genéticos para diferentes tiempos máximos de *offset*

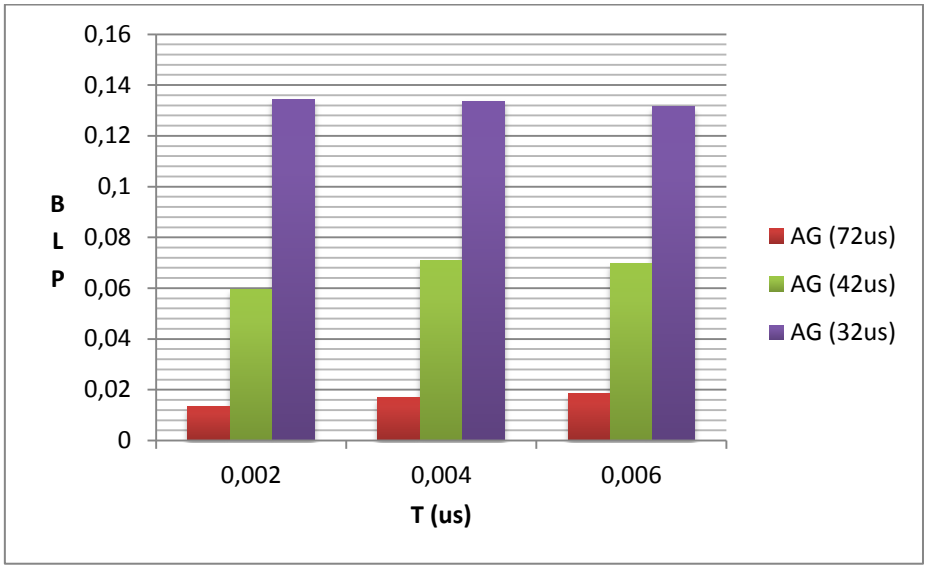


Figura 4.45. Probabilidad de bloqueo de la red usando algoritmos genéticos para diferentes tiempos máximos de *offset*.

La Figura 4.42 muestra la variación de la probabilidad de bloqueo al cambiar los rangos de tiempo *offset*, como se puede observar para el intervalo de tiempo más amplio (20-72 μs), las probabilidades de bloqueo son mucho menores en comparación con los otros intervalos, siendo el intervalo menor (20-32 μs) el que muestra el peor desempeño acercando sus valores de probabilidad de bloqueo a 0.14.

Estos valores se pueden tener en cuenta para la elección óptima de parámetros que permiten una mejor operación para transporte de TCP sobre OBS.

EXP=(0.000032s)	Probabilidad de bloqueo de la red con AG y control cognitivo (PBAGC 72 μs)	Probabilidad de bloqueo de la red con AG y control cognitivo (PBAGC 42 μs)	Probabilidad de bloqueo de la red con AG y control cognitivo (PBAGC 32 μs)
0.002s	0.00904438	0.05894	0.1276
0.004s	0.01601	0.0661	0.12998
0.006s	0.01888	0.0666	0.13084

Tabla 4.12. Probabilidad de bloqueo de la red usando algoritmos genéticos con control cognitivo y diferentes tiempos máximos de *offset*

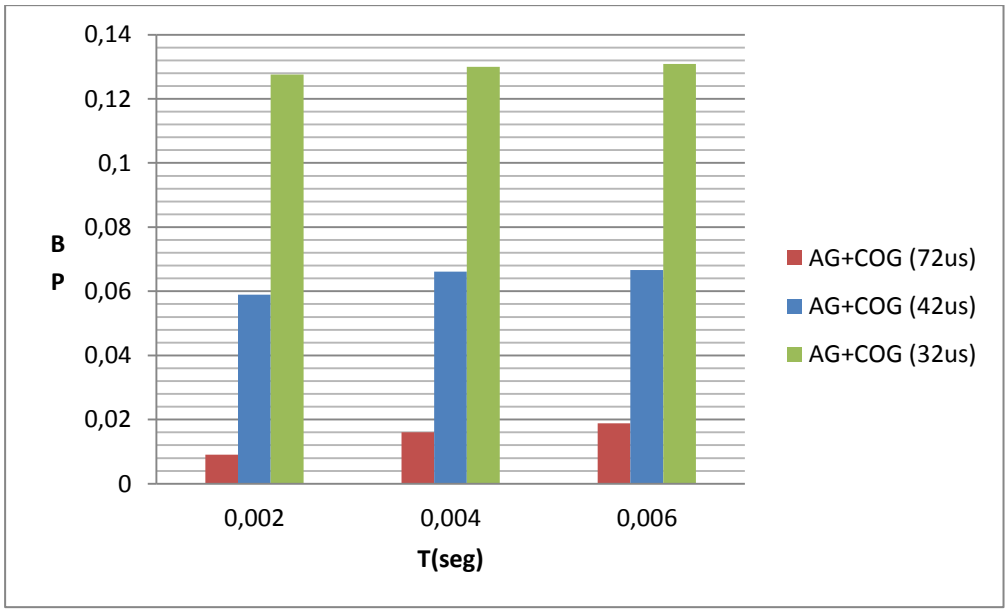


Figura 4.46. Probabilidad de bloqueo de la red usando algoritmos genéticos con control cognitivo y diferentes tiempos máximos de *offset*

La Figura 4.46 muestra la variación de la probabilidad de bloqueo al cambiar los rangos de tiempo *offset*, como se puede observar para el intervalo de tiempo más amplio (20-72 μs), las probabilidades de bloqueo son mucho menores en comparación con los otros intervalos, siendo el intervalo menor (20-32 μs) el que muestra el peor desempeño acercando sus valores de probabilidad de bloqueo a 0.13.

Se puede inferir un valor con mejor comportamiento de *offset*, el cual puede considerarse como el valor ideal para este escenario en particular.

EXP=(32us) Población inicial 6.	Probabilidad de bloqueo para AG (PBAG 72 μs)	Probabilidad de bloqueo para AG con cognición. (PBAGC 72 μs)	Probabilidad de bloqueo para AG (PBAG 42 μs)	Probabilidad de bloqueo para AG con cognición (PBAGC 42 μs)	Probabilidad de bloqueo para AG (PBAG 32 μs)	Probabilidad de bloqueo para AG con cognición. (PBAGC 32 μs)
0.002s	0.013398	0.00904438	0.0593	0.05894	0.1342	0.1276
0.004s	0.016826	0.01601	0.07066	0.0661	0.13364	0.12998
0.006s	0.01834	0.01888	0.06966	0.0666	0.13136	0.13084

Tabla 4.13. Comparación de la probabilidad de bloqueo de la red usando algoritmos genéticos con y sin cognición para diferentes tiempos máximos de *offset*

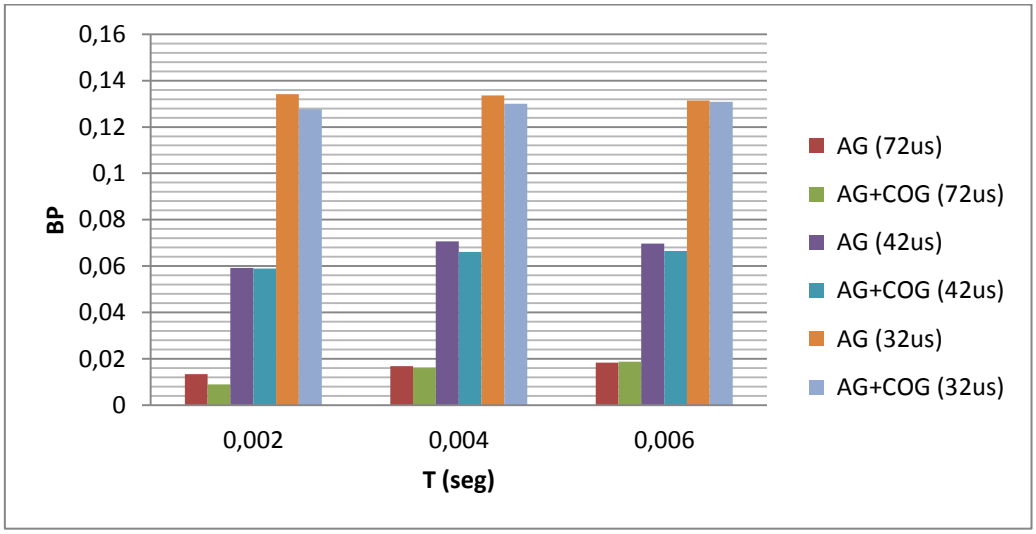


Figura 4.47. Comparación de la probabilidad de bloqueo de la red OBS algoritmos genéticos con y sin cognición para diferentes tiempos máximos de *offset*

La Figura 4.47 muestra la variación de la probabilidad de bloqueo al cambiar los rangos del tiempo *offset* cuando se trabaja con AG con y sin cognición, como se puede observar para todos los intervalos de tiempo se obtiene mejor respuesta usando el AG con control cognitivo, para el cual las probabilidades de bloqueo se encuentran en el mejor de los casos (para el intervalo de 20-72 μs) entre 0.009 y 0.018.

Del comportamiento de las redes frente a la probabilidad de bloqueo, se puede mencionar que para los valores de tiempo analizados, variando los rangos de *offset* entre ellos, de un total de 9 resultados, solo en un caso la probabilidad de bloqueo es menor para la red que implementa algoritmos genéticos sin control cognitivo. De esto se infiere que el existe un 11.11% de probabilidad (para la red desarrollada), que el

desempeño de la red mejore usando el método de AG sin cognición en comparación con el algoritmo que implementa el método de control cognitivo. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el margen de confiabilidad de los resultados es del 85%.

4.5.3.2. Variación de la velocidad de transmisión

En este escenario se evalúa el desempeño en términos de la probabilidad de bloqueo al variar la velocidad de transmisión.

Las características asignadas para esta prueba se muestran en la tabla.

Parámetros	Características
Intervalo *offset*	(20 - 72) μs
Número de Generaciones del AG	1 Generación
Población inicial del AG	6 rutas
Longitudes de Onda	NSFNeT 1

Tabla 4.14. Características establecidas en la segunda prueba

Por criterios de diseño se escogen las velocidades de 2,5 y 10Gbps[47]; en la tabla 4.14 se puede observar el efecto generado por este parámetro.

EXP=(0.000032s)	**PBAG 2,5Gbps.**	**PBAGC 2,5Gbps.**	**PBAG 10Gbps.**	**PBAGC 10Gbps.**
0,002s	0,013398	0,009044	0,01028	0,0034646
0,004s	0,016926	0,01601	0,01078	0,0095946
0,006s	0,01834	0,01888	0,01078	0,01078

Tabla 4.15. Efecto de la variación de la velocidad de transmisión para un *offset* máximo de 72 μs

La figura 4.48 permite analizar el desempeño de los algoritmos al aplicar diferentes velocidades en los caminos ópticos. Se obtiene una mejor respuesta en términos de probabilidad de bloqueo para los AG que trabajan con cognición, utilizando una velocidad de 10Gbps.

[47] Se seleccionan estas velocidades que corresponden a los dos (2) valores más comerciales en el momento para redes ópticas dentro del conjunto {2,5; 10; 40; 100} Gbps.

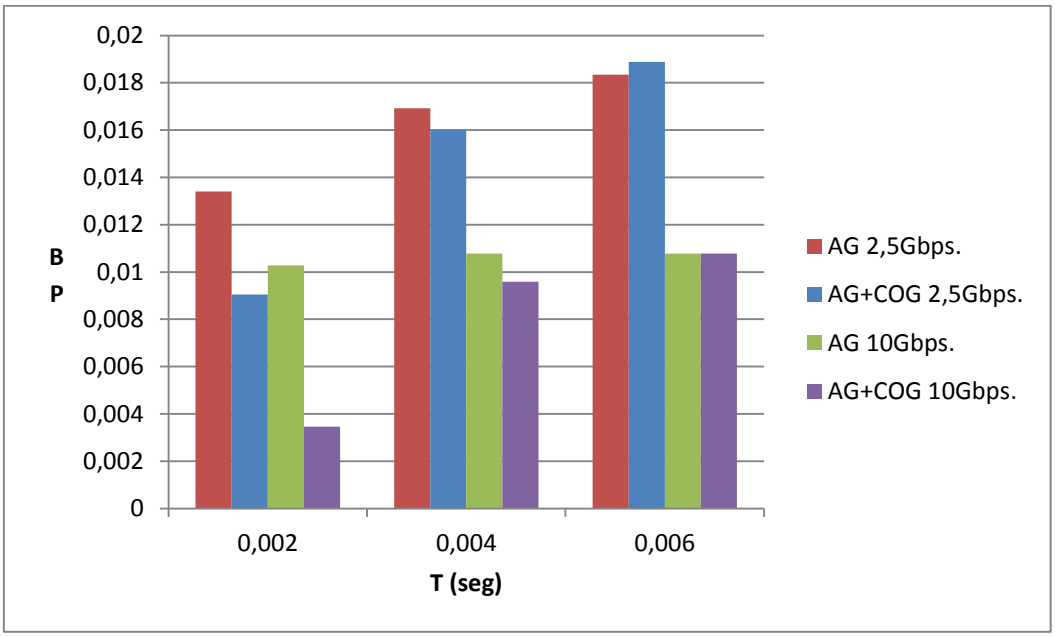


Figura 4.48. Efecto de la variación de la velocidad de transmisión

Para velocidades más grandes 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 un menor tiempo en viajar por los caminos ópticos, logrando menores pérdidas de ráfagas debido al tiempo *offset*.

Usando una velocidad de transmisión de 10Gbps y *offset* máximo de 72 μs, los valores de probabilidad de bloqueo disminuyen para el algoritmo genético con control cognitivo en dos de los 3 resultados. Se infiere por lo tanto que aproximadamente en el 66% ±15% de los casos analizados (usando los parámetros anteriormente mencionados), con este método heurístico es posible obtener un mejor desempeño de la red.

De los resultados obtenidos al realizar la comparación entre velocidades de transmisión de 2,5 y 10Gbps, se infiere que la probabilidad de bloqueo disminuye en un 23.22%, 36.76% y 41.53% para los tiempos de 0.002, 0.004 y 0.006 segundos (en tiempo de simulación) respectivamente, al usar velocidades entre enlaces de 10Gbps.

4.5.3.3. Observaciones mediante la variación de Longitudes de Onda

Los resultados mostrados en este escenario dependerán del efecto de la variación de las longitudes de onda (4, 8 y 16 Lambdas), utilizando las configuraciones establecidas previamente. Las características asignadas para estas pruebas se muestran a continuación la tabla 4.15. Por su parte la tabla 4.16 contiene los resultados obtenidos.

Parámetros	Características
Intervalo *offset*	(20 - 72) μs
Número de Generaciones del AG	1 Generación
Población inicial del AG	6 rutas
Velocidad de transmisión	10Gbps

Tabla 4. 16. Características establecidas en la tercera prueba

EXP=(0.000032s)	PBAG	PBAGC
4L	0.008255	0.007306
8L	0.008735	0.00712
16L	0.007308	0.006724

Tabla 4. 17. Efecto de la variación de las longitudes de onda

La probabilidad de bloqueo puede observarse en la Figura 4.49, indicando que el AG con control cognitivo presenta un mejor desempeño. Es posible notar que para los algoritmos implementados, se presenta una disminución en la probabilidad de bloqueo a medida que aumenta el número de longitudes de onda por enlace. Esto se debe a la influencia el número de caminos ópticos libres sobre la función de aptitud aplicada.

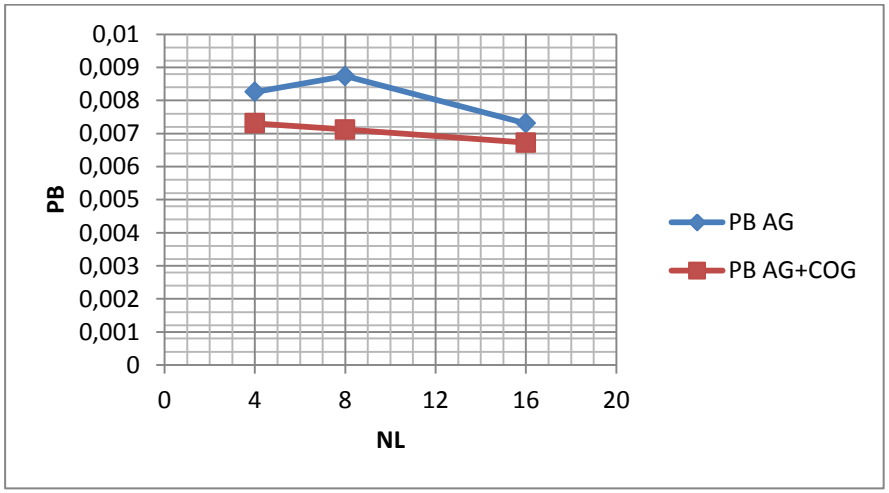


Figura 4.49. Efecto de la variación de las longitudes de onda NSFNeT1

Los resultados conseguidos al variar las longitudes de onda en las dos redes implementadas, muestran que para los tres casos analizados (es decir, el 100% de los casos con un margen de error del 15%), el comportamiento de la probabilidad de bloqueo es mejor para los AG que presentan métodos de control cognitivo. Además, este último exhibe la relación inversamente proporcional entre la probabilidad de bloqueo y el número de longitudes de onda por enlace.

4.5.3.4. Variación del número de generaciones del algoritmo genético

El último escenario analizado tiene en cuenta el número de iteraciones que el algoritmo genético podría realizar para obtener la ruta resultante.

El escenario presenta las siguientes características.

2.5.1.

Parámetros	Características
Intervalo *offset*	(20 - 72) μs
Longitudes de onda	NSFNeT 1
Población inicial del AG	6 rutas
Velocidad de transmisión	10Gbps

Tabla 4. 18. Características establecidas en la cuarta prueba

El efecto de la variación de las generaciones se muestra en la tabla 4.18.

EXP=(0.000032s)	PBAG una Generación	PBAG dos (2) Generaciones	PBAG tres(3) Generaciones
0.002s	0.0133	0.013	0.01281
0.003s	0.01766	0.0175	0.01694
0.004s	0.02003	0.019	0.01804

Tabla 4.19. Efecto de la variación de las generaciones en el AG

En las Figuras 4.50 4.51 y 4.52 se analiza el efecto en la probabilidad de bloqueo creado por el cambio de dicho parámetro. Al parecer en la medida que se aumenta el numero de generaciones creadas, la probabilidad de bloqueo tiene un mejor comportamiento (disminuye).

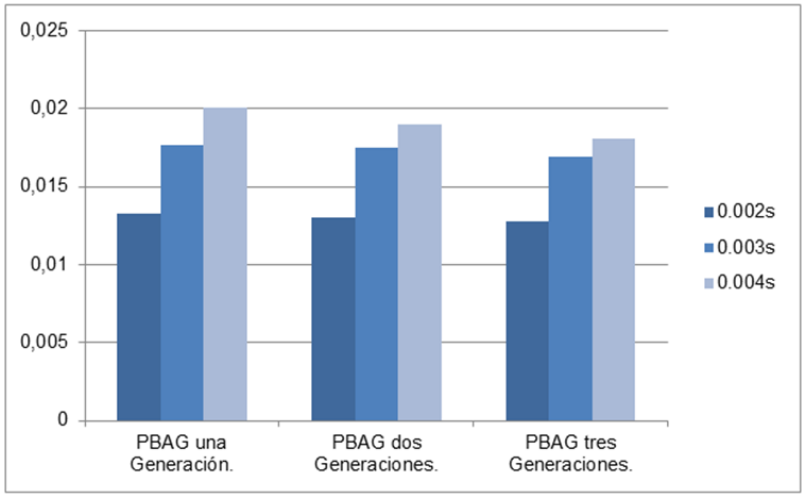


Figura 4.50. Efecto de la variación de las generaciones en el AG

EXP=(0.000032s)	PBAGC una Generación.	PBAGC dos Generaciones.	PBAGC tres Generaciones.
0.002s	0.0102	0.0075	0.005432
0.003s	0.01357	0.00993	0.009578
0.004s	0.01489	0.01125	0.01059

Tabla 4.20. Efecto de la variación de las generaciones en el AG + COG

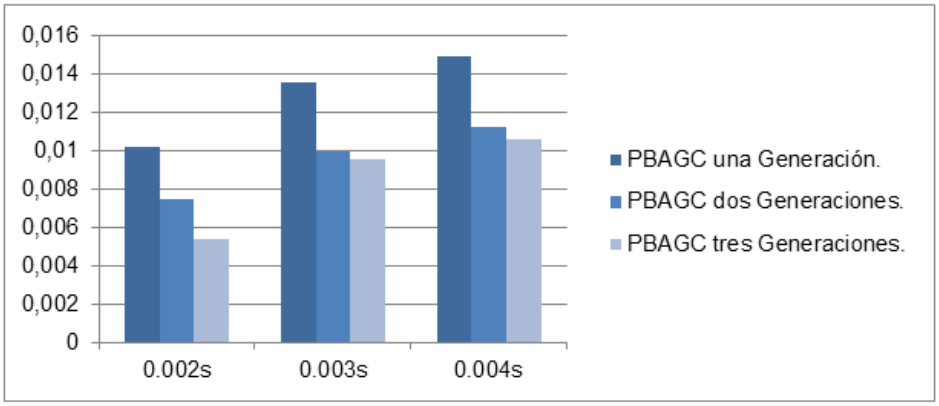


Figura 4.51. Efecto de la variación de las generaciones en el AG + COG

EXP=(0.000032s)	PBAG una Generación	PBAG dos Generaciones	PBAG tres Generaciones	PBAGC una Generación	PBAGC dos Generaciones	PBAGC tres Generaciones
0.002s	0.0133	0.013	0.01281	0.0102	0.0075	0.005432
0.003s	0.01766	0.0175	0.01694	0.01357	0.00993	0.009578
0.004s	0.02003	0.019	0.01804	0.01489	0.01125	0.01059

Tabla 4.21. Efecto de la variación de las generaciones en el AG con y sin cognición

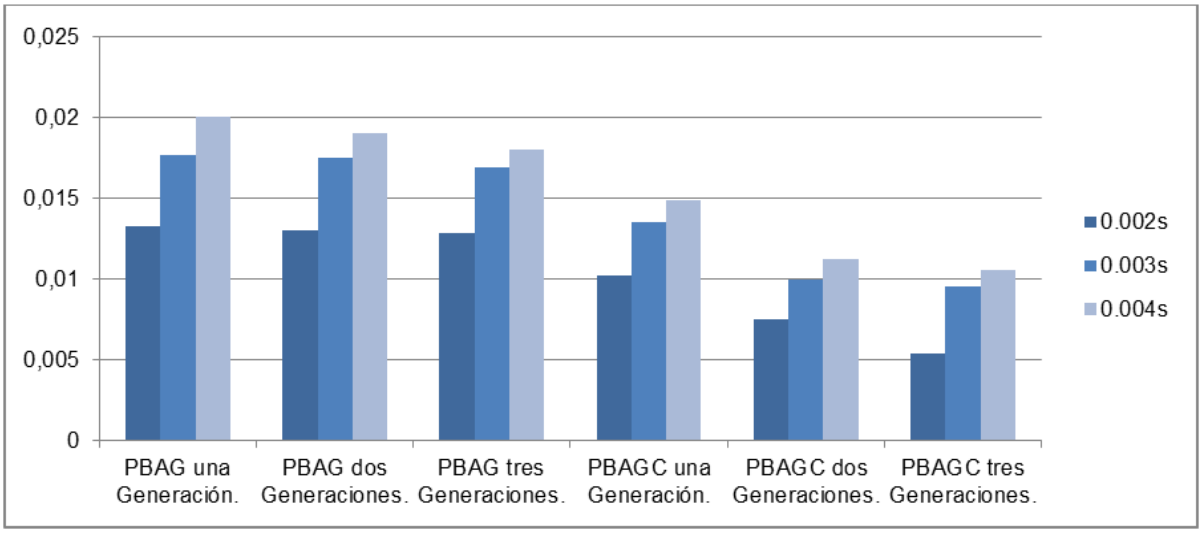


Figura 4.52. Efecto de la variación de las generaciones en el AG con y sin cognición

Se puede concluir que entre más número de iteraciones se generen, la pérdida de ráfagas sobre la red es menor. Esto se debe a que aumenta la probabilidad de obtener una mejor ruta a medida que crece el número de generaciones del algoritmo.

4.5.4. Escenarios de simulación para analizar el tiempo de procesamiento en redes OBS basada en algoritmos genéticos con y sin métodos de control cognitivo

4.5.4.1. Variación del número de rutas iniciales del algoritmo genético

El análisis presentado a continuación permite obtener los resultados del tiempo de procesamiento generado para el establecimiento de las rutas de un número determinado de ráfagas.

El número de ráfagas utilizado para analizar los tiempos de procesamiento se limita a un valor no tan elevado debido al riguroso proceso y tiempo que demanda el análisis de las rutas desde la interfaz gráfica de usuario. Cada vez que se aumenta o cambia alguno de los parámetros implica un largo proceso de simulación.

Las características asignadas al iniciar la simulación se muestran en la tabla 4.21.

Parámetros	Características
Intervalo *offset*	(20 - 72) us
Longitudes de onda	NSFNeT 1
Número de generaciones del AG	1 Generación
Velocidad de transmisión	10Gbps

Tabla 4.22. Características establecidas en la cuarta prueba

En las figuras 4.53, 4.54 y 4.55 se puede observar que el número de rutas iniciales tiene una relación directamente proporcional con el tiempo de procesamiento, aunque el cambio no es muy notorio debido a que los valores en los que se diferencian se encuentran en el orden de los microsegundos.

EXP=(0.000032s) NR (Número de Ráfagas)	Tiempo de procesamiento para AG con una población inicial de 5 rutas (TPAG 5)	Tiempo de procesamiento para AG con una población inicial de 6 rutas (TPAG 6)	Tiempo de procesamiento para AG con una población inicial de 7 rutas (TPAG 7)
600	0.00493	0.005179	0.005181
1000	0.005545	0.005684	0.00573
1200	0.006515	0.006412	0.006708
14000	0.007655	0.007212	0.007308

Tabla 4.23. Efecto de la variación del número de rutas iniciales para en análisis del tiempo de procesamiento trabajando con AG

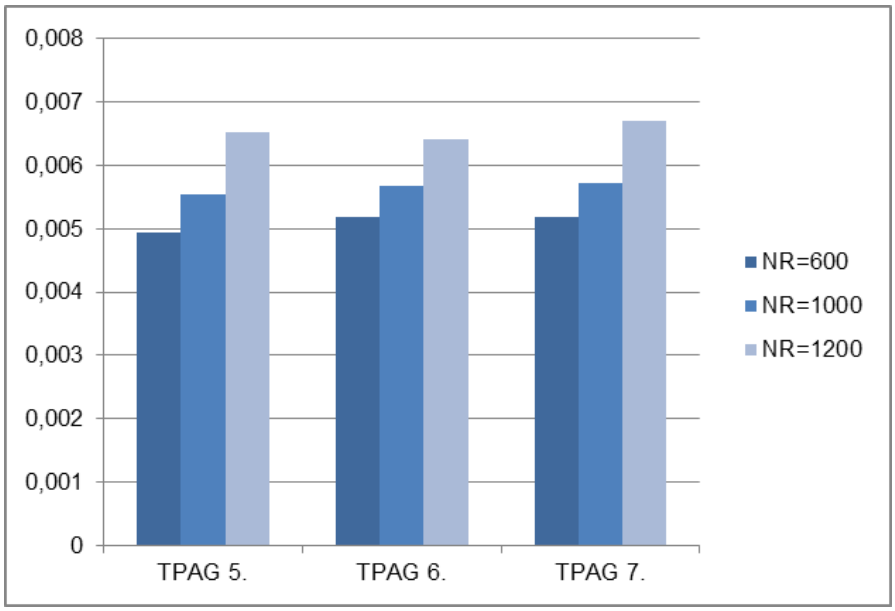


Figura 4.53. Efecto de la variación del número de rutas iniciales para el análisis del tiempo de procesamiento trabajando con AG

EXP=(0.000032s) NR (Número de Ráfagas)	Tiempo de procesamiento para AG con cognición para una población inicial de 5 rutas. (TPAGC 5)	Tiempo de procesamiento para AG con cognición para una población inicial de 6 rutas. (TPAGC 6)	Tiempo de procesamiento para AG con cognición para una población inicial de 7 rutas. (TPAGC 7)
600	0.005179	0.005184	0.0051997
1000	0.005522	0.005475	0.005322
1200	0.006433	0.006415	0.006419

Tabla 4.24. Efecto de la variación del número de rutas iniciales para en análisis del tiempo de procesamiento trabajando con AG con control cognitivo

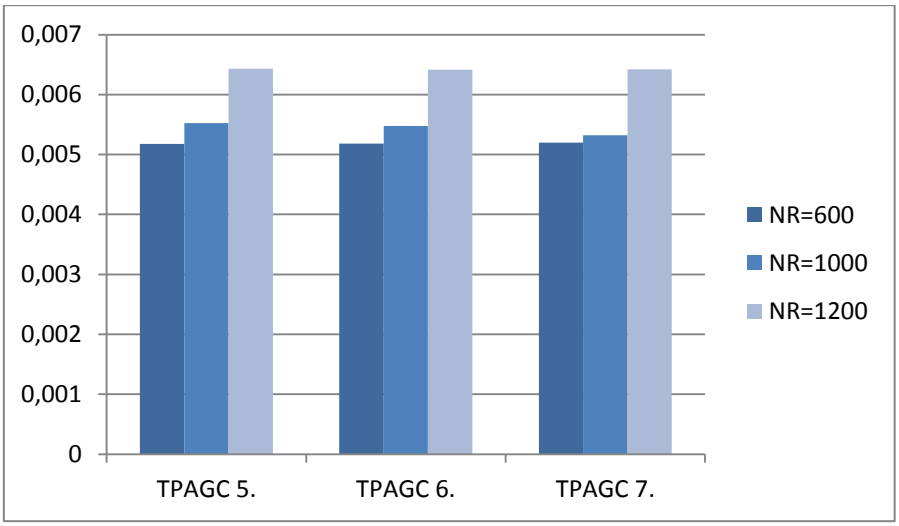


Figura 4.54. Efecto de la variación del número de rutas iniciales para el análisis del tiempo de procesamiento trabajando con AG con control cognitivo

EXP=(0.000032s) NR (Número de Ráfagas)	Tiempo de Procesamiento para AG con una población inicial de 5 rutas. (TPAG 5)	Tiempo de Procesamiento para AG con control cognitivo para una población inicial de 5 rutas. (TPAGC 5)
600	0.00493	0.005179
1000	0.005545	0.005522
1200	0.006515	0.006433

Tabla 4.25. Comparación para AG con y sin cognición para una población inicial de 5 rutas en la estimación del tiempo de procesamiento

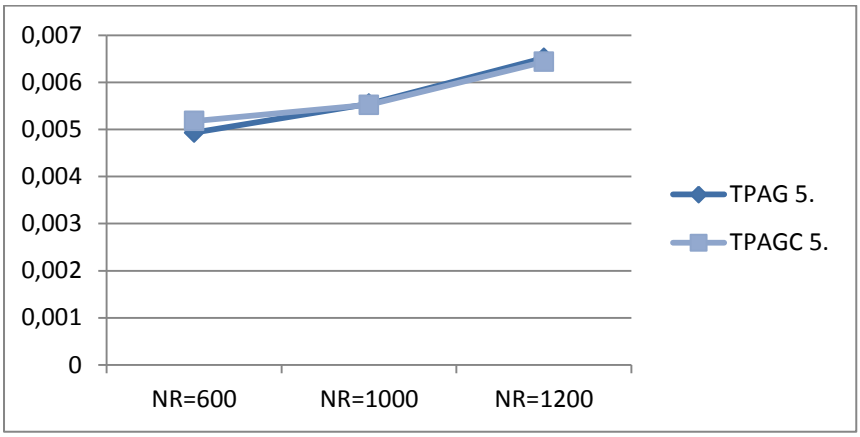


Figura 4.55. Comparación para AG con y sin cognición para una población inicial de 5 rutas en la estimación del tiempo de procesamiento

EXP=(0.000032s) NR (Número de Ráfagas)	Tiempo de Procesamiento para AG con una población inicial de 6 rutas. (TPAG 6)	Tiempo de Procesamiento para AG con control cognitivo para una población inicial de 6 rutas. (TPAG+COG 6)
600	0.005179	0.005184
1000	0.005684	0.005475
1200	0.006412	0.00637
1400	0.00739	0.00677

Tabla 4.26. Comparación para AG con y sin cognición para una población inicial de 6 rutas en la estimación del tiempo de procesamiento

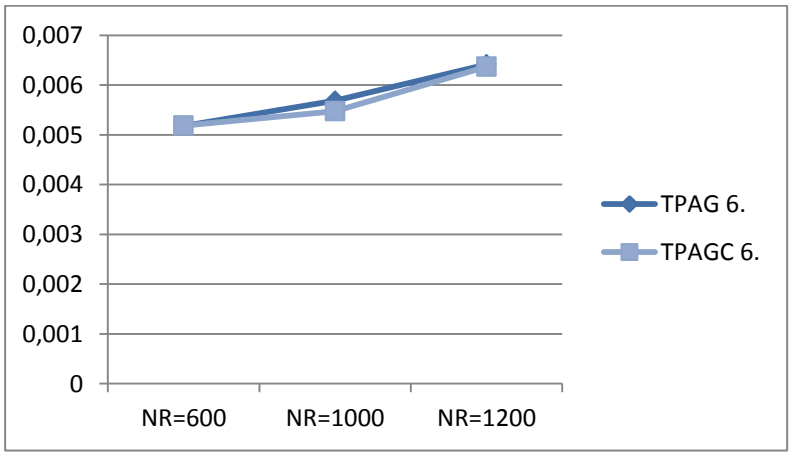


Figura 4.56. Comparación para AG con y sin cognición para una población inicial de 6 rutas en la estimación del tiempo de procesamiento

EXP=(0.000032s) NR (Número de Ráfagas)	Tiempo de Procesamiento para AG con una población inicial de 7 rutas (AG 7)	Tiempo de Procesamiento para AG con control cognitivo para una población inicial de 7 rutas (AG+COG 7)
600	0.005181	0.0051997
1000	0.00573	0.005622
1200	0.006708	0.006699
1400	0.00771	0.007628

Tabla 4.27. Comparación para AG con y sin cognición para una población inicial de 7 rutas en la estimación del tiempo de procesamiento

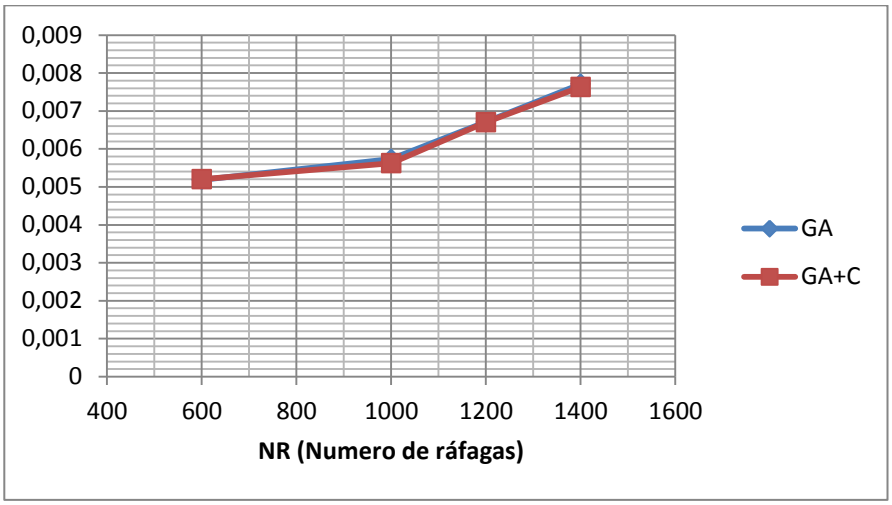


Figura 4.57. Comparación para AG con y sin cognición para una población inicial de 7 rutas en la estimación del tiempo de procesamiento

En las gráficas anteriores se analiza el efecto del número de rutas iniciales en el tiempo de procesamiento, los resultados presentados para dichos tiempos por los dos (2) métodos heurísticos, no difieren considerablemente entre sí, sin embargo, se puede observar que para el algoritmo que presenta métodos de control cognitivo los resultados son más favorables. Específicamente, en 6 de los 9 resultados, el AG con el método de control cognitivo presenta un mejor tiempo de procesamiento (tiempo menor), infiriendo que así será en el 66.66% ±15% de los casos.

4.6. Resultados generales

Seguidamente se muestran resultados generales donde se aprecia el comportamiento de los métodos cognitivos comparados entre sí para algunos

escenarios de prueba y los resultados de aplicar ANN en los procesos de ensamble de ráfagas. Al final de la sección se muestra el resultado de emplear TCP sobre OBS, la influencia de los métodos de ensamble de ráfagas por tiempo y por umbral de longitud sobre el comportamiento del *throughput* TCP.

4.6.1. Muestra comparativa de GA y GA + Cognición con ACO para RWA

La figura 4.58 muestra el resultado de comparar los métodos basados en GA y ACO para el modelo de red NSFNeT2.

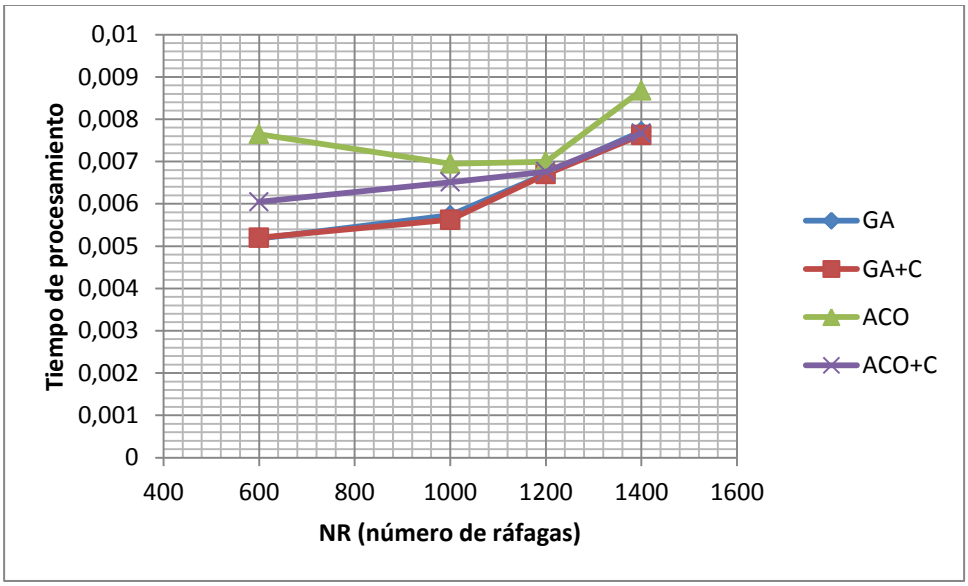


Figura 4.58. Comparación entre ACO y GA

Como se observa en la figura 4.58, el comportamiento de GA sigue mostrando un comportamiento esperado ya que en la generación de más ráfagas se requiere de más tiempo de procesamiento, es importante notar que este algoritmo lleva a cabo primero el proceso de las ráfagas que con ACO, la razón puede ser que ACO parte de un proceso de búsqueda meramente aleatorio mientras que GA puede ayudarse los resultados iniciales que muestra la herramienta.

4.6.2. Muestra comparativa de GA y ACO + PSO para RWA

A partir de la tabla 4.28 se genera la figura 4.59 donde se muestra el comportamiento de la red OBS para un conjunto de rutas iniciales de 7 y tomando el comportamiento de PSO sobre la base construida a partir de ACO. En este caso se ha empleado el

conjunto inicial creado por cTopology como base para GA. Similar a casos anteriores, GA con y sin cognición presenta mejores resultados que ACO+PSO. Una razón puede ser el retardo que muestra ACO para construir el espacio de búsqueda de PSO. ACO + PSO tienden a encontrar un óptimo global.

NR (Número de Ráfagas) EXP=(0.000032s)	GA	GA+C	PSO	PSO+C
600	0,005181	0,0051997	0,00646581	0,00604581
1000	0,00573	0,005622	0,00651273	0,00651273
1200	0,006708	0,006699	0,0069708	0,00659708
1400	0,00771	0,007628	0,00797671	0,00766971

Tabla 4.28. Comparación para AG con y sin cognición para una población inicial de 7 rutas en la estimación del tiempo de procesamiento

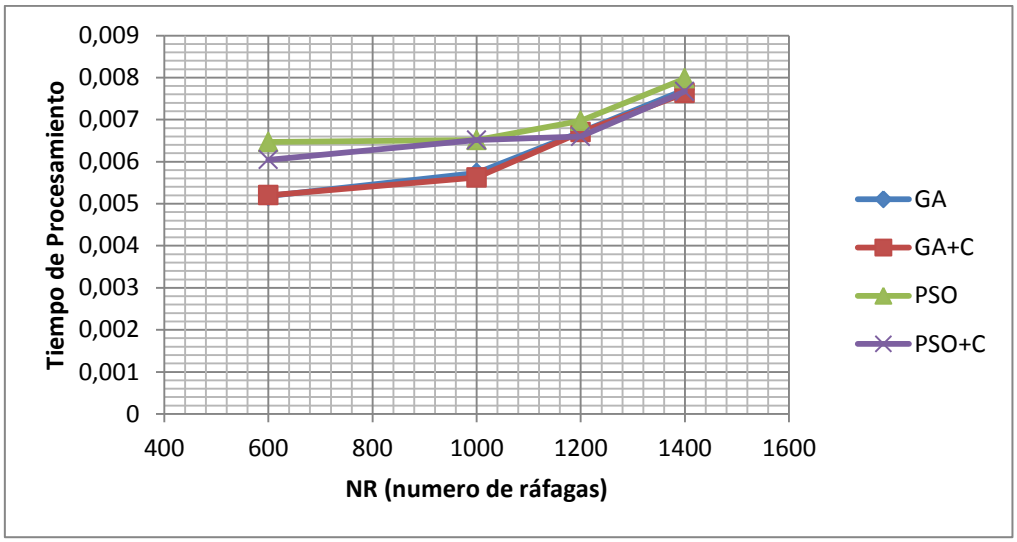


Figura 4.59. Comparación entre ACO+PSO y GA

4.6.3. Muestra comparativa de GA y ACO para RWA

EXP=(0.000032s)	PB AG	PB AG+COG	PB ACO	PB ACO+COG
4	0,008255	0,007306	0,0091749	0,00871749
8	0,008735	0,00712	0,0093782	0,00879378
16	0,008255	0,006724	0,00876382	0,00763821

Tabla 4.29. Comparación para AG con y sin cognición para una población inicial de 7 rutas en la estimación del tiempo de procesamiento

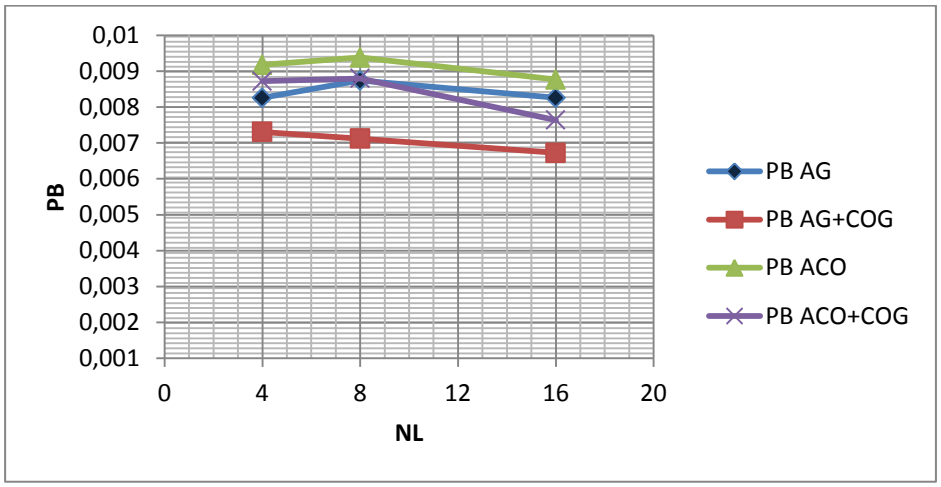


Figura 4.60. Comparación PB para GA y ACO

De la figura 4.60 se sacan algunas conclusiones iniciales, en principio se observa como las soluciones cognitivas tienden a tener un mejor comportamiento, lo cual está acorde con la literatura revisada al respecto. Sin embargo, no es tan superior como se podría suponer dadas las características de medición con escenarios similares. Igualmente, esta gráfica muestra cierta tendencia de mejora en GA que en ACO, la literatura al respecto no se pone de acuerdo, esto puede ocurrir debido a la naturaleza local de ACO y su diferencia con GA.

4.6.4. Comportamiento de ANN sobre OBS

Se observa como el empleo de ANN puede mejorar el desempeño de la red OBS. En este caso al introducir la ANN seleccionando el método de ensamble acorde con el tráfico presente a la entrada de los nodos. Se mide el impacto del mecanismo de ensamble sobre TCP Reno específicamente sobre el *throughput* TCP. Las variables de simulación “maxTime” que expresa el tiempo T de ensamble y el umbral de ráfaga o “maxSize” que forma parte del módulo “Burstifier” de la implementación de OBS se pueden varia en rangos de:

maxTime = {0,001s – 0,01s} para verificar la probabilidad de bloqueo PB, con lo cual el *throughput* TCP disminuye si la PB aumenta. Igualmente se procede para valores de maxSize = {125 – 125x10(6)}.

La figura 4.61 muestra los resultados para diferentes valores de maxTime y la figura 4.62 muestra diferentes valores para maxSize y su impacto sobre el *throughput* de entrada (TCP).

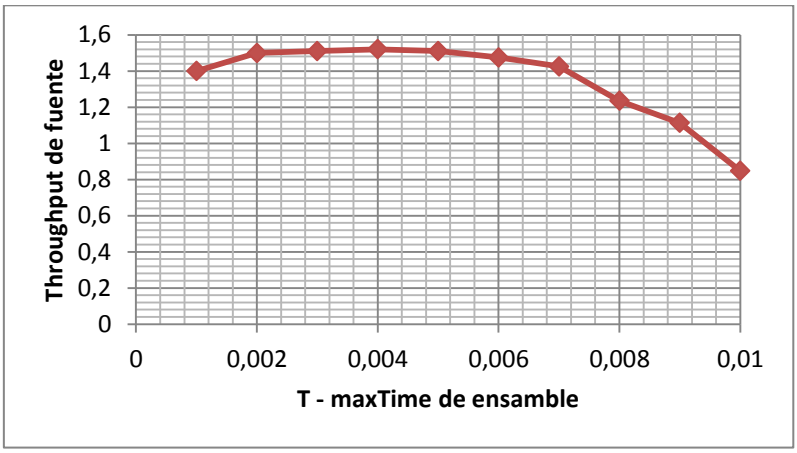


Figura 4.61. Impacto del valor de T para ensamble de ráfagas red OBS

En este caso se probó con la red NSFNeT2 y sin mecanismos de cognición. Se aprecia en la figura 4.61 que al aumentar el valor de tiempo de ensamble, el *throughput* disminuye, lo cual está en consonancia con lo esperado ya que se considera que al estar más tiempo en la cola de ensamble, los paquetes van a experimentar mayores retardos que los esperados, el valor que incrementa su valor es el RTT de TCP. Inclusive puede ser que el valor de maxTime supere el tiempo máximo de propagación del paquete dentro de la ráfaga lo que daría lugar a que la aplicación TCP lo de por perdido.

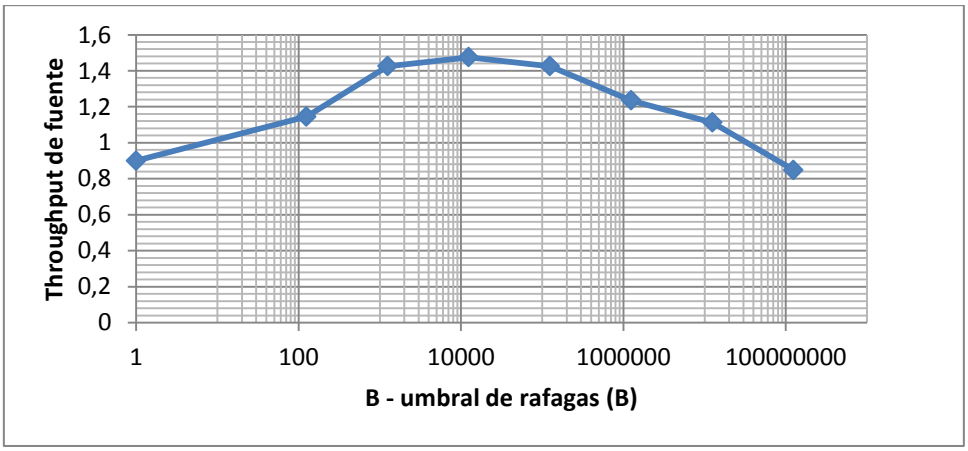


Figura 4.62. Comportamiento del *throughput* al variar el umbral B

Como en el caso anterior, esta figura muestra el impacto del tamaño de la ráfaga en el *throughput* de fuente, como se espera al fijar valores muy pequeños de ráfaga y con tamaños grandes de segmentos TCP el sistema tiende a responder como si necesitara más de una ráfaga por segmento. El comportamiento del sistema mejora para ciertos valores (125000B) y tiende a desmejorar para valores mayores, esta prueba permite redefinir valores de T y B para un mejor comportamiento del sistema de red OBS con NSFNeT2 y sin mecanismos cognitivos.

Las figuras anteriores muestran que se puede contar con valores de comportamiento cercanos al óptimo para T y B con el escenario de prueba. Un maxTime alrededor de 0,04s representa un mejor comportamiento mientras que para un maxSize de 125x103B se presenta una mejor respuesta del sistema.

La propuesta de incluir ANN en los procesos de ensamble de ráfagas en los nodos de borde o frontera se puede afrontar desde diferentes enfoques. Desde incluir este mecanismo para encontrar los valores de B, $Bmin$ y T con mejores prestaciones, hasta obtener ayuda en la elección del método de ensamble que mejor se adapte a las condiciones del tráfico presente a la entrada del nodo o respecto a los requerimientos de conexión presentes.

En esta ocasión se busca que la ANN ayude a seleccionar el mecanismo de ensamble de ráfagas que mejor se adapte a las variaciones de tráfico a la entrada de la red OBS. En un principio se emplean diferentes fuentes Poisson a la entrada del módulo *Burstifier* (fuentes con diferentes valores de *interArrivalTime*) y después se puede probar con diferentes clases de comportamientos TCP.

El diseño propuesto consta de un bloque que contiene la ANNBP (*Artifical Neural Network Back Propagation*) a la cual se le presentan valores promedio de *interArrivalTime* para las fuentes de tráfico ante lo cual la ANN acondiciona sus pesos para seleccionar el mecanismo de ensamble que se debe utilizar. Como se conoce del Capítulo 2, estos mecanismos son *timer-based*, umbral de ráfaga o *burst length-based*, mixto, aunque puede incluirse algún mecanismo predictivo. Este último puede tratar de predecir la longitud de la ráfaga antes ser formada, dicho valor de longitud se coloca en el BCP y se envía hacia el núcleo de la red OBS.

En general el mecanismo que se propone tiene un comportamiento de sistema experto “síntomas” – “enfermedad” o “enfermedad” – “posible tratamiento”, es decir se toman los “síntomas” a la entrada del sub módulo *burstifier* y se decide que solución se ajusta más a esos requerimientos.

El modelo en bloques se muestra en la figura 4.63, este módulo es llamado módulo de control MC. La herramienta de simulación OMNeT++ posee mecanismos para generar con distintas funciones de probabilidades tanto discretas como continuas, aunque en este caso por tratarse de representar la red mediante simulación de eventos discretos se utilizan diferentes fuentes que representan el tráfico.

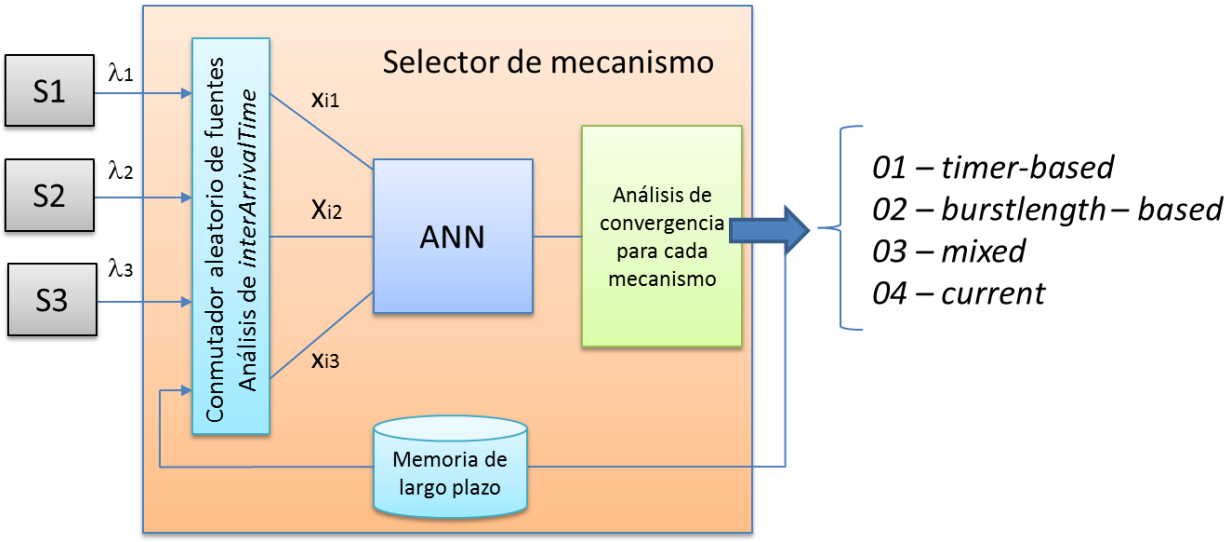


Figura 4.63. Módulo de Control MC para el *Burstifier* OBS

En los procesos previos al trabajar con la red OBS convencional, se realizaron medidas de bloqueo de ráfagas con escenarios puntuales sin la presencia de mecanismo de cognitivos, en seguida se toma uno de estos escenarios y se prueba el módulo mostrado en la figura 4.63. Su descripción funcional comienza teniendo un conjunto de fuentes que generan paquetes IP a diferentes velocidades con tiempos de llegada Poisson. Estas fuentes están conectadas de una conmutador que mediante una función aleatoria es seleccionada para que envie sus paquetes hacia la red neuronal la cual de acuerdo a la variación del tráfico a la entrada selecciona un método de ensamble de ráfagas. Los resultados de convergencia se almacenan en una memoria para posteriores entradas. Aunque en la figura no se hace visible, se

debe guardar una relación entre tráfico de entrada y el método seleccionado para una próxima ocasión.

Los resultados comparativos se muestran en la figura 4.64. Se toma el escenario para el cálculo de la Probabilidad de Bloqueo al variar el número de lambdas disponibles W = {4, 8, 16}, se emplea NSFNeT1 con tiempos T y B fijos, luego se incluye el módulo selector de mecanismo y se toman pruebas con los mismos parámetros pero en este caso se revisa el proceso de selección de método según el tráfico de entrada, los resultados se muestran en la figura tienden a mostrar un mejor comportamiento para 16 longitudes de onda, pero no son concluyentes sobre la incidencia del módulo de prueba.

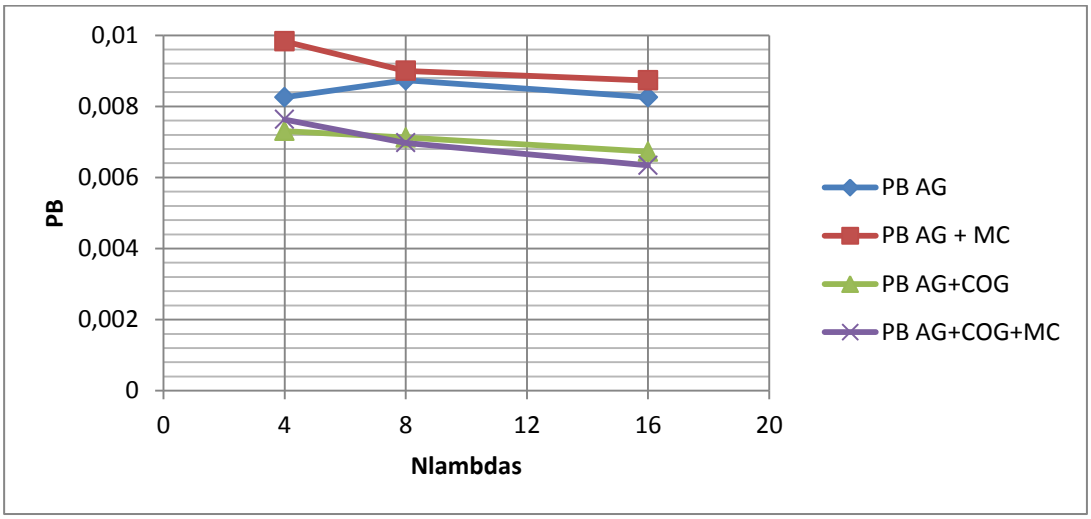


Figura 4.64. Prueba del MC en escenario respecto al número de lambdas

Como se observa en la figura 4.64 los resultados iniciales no son contundentes respecto a lo esperado[48], los escenarios con la inclusión del módulo selector de método de ensamble causa un efecto inicial aumentar la probabilidad de bloqueo para 4 lambdas, se espera que sin depender tanto de los procesos de ensamble, contar con más recursos (longitudes de onda) debe mejorar la Probabilidad de Bloqueo.

[48] Se esperaría que este módulo supere las expectativas de comportamiento del método mixto para ensamble de ráfagas.

En la figura 4.65 se representa mediante barras los mismos resultados, sin embargo se puede apreciar que la inclusión de heurísticas como AG y Cognición presenta una mejoría respecto a los escenarios sin cognición. Igualmente, para 16 longitudes de onda el método compuesto AG + Cognición + MC muestra un mejor comportamiento que los escenarios anteriores, aunque puede ser por el efecto de contar con más recursos.

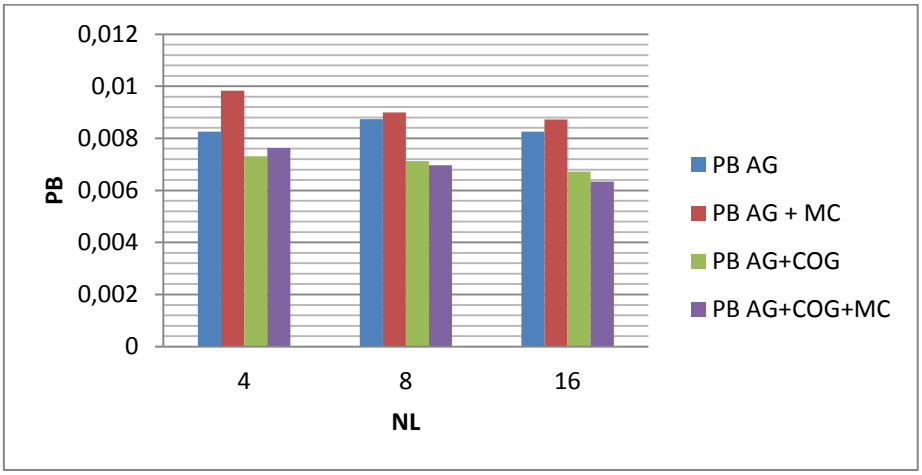


Figura 4.65. Comparación de escenarios con la inclusión del MC

Debido a lo anterior se toma una prueba realizada que permita revisar la generación de ráfagas en tiempo de procesamiento y el efecto de la velocidad de transmisión sobre los enlaces (tablas 4.13 y 4.14). Los resultados comparativos se aprecian en la figura 4.66.

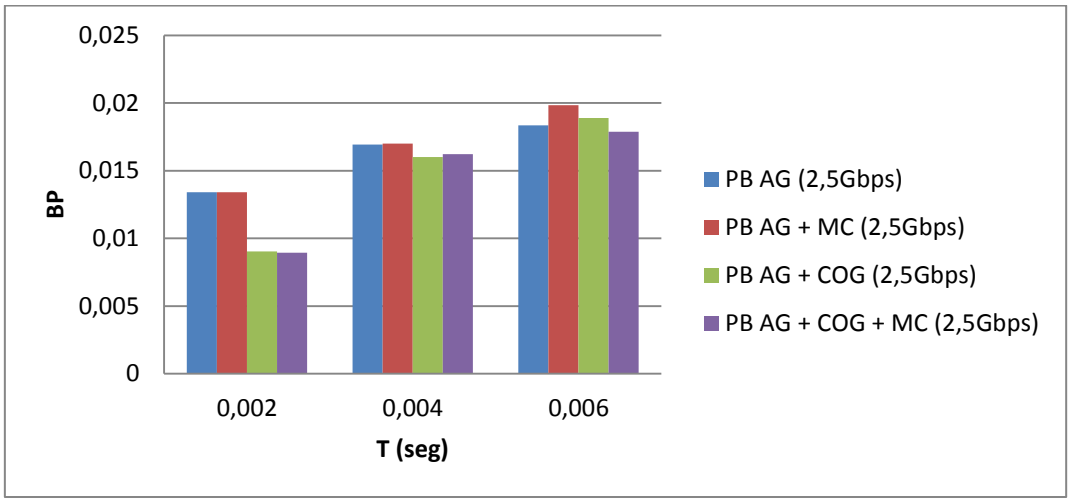


Figura 4.66. Resultados de AG + COG e incluyendo MC a 2,5Gbps

Según esta figura y luego de algunas revisiones, se puede notar una ligera mejoría en la PB cuando se emplea el módulo MC. Se han realizado pruebas a 10Gbps, con resultados similares. Finalmente, se espera que para valores mayores de tiempos y numero de longitudes de onda el sistema haya aprendido lo suficiente y permita agregarle el cálculo previo de valores optimos para $T, Bmin\ y\ B$.

4.6.5. Comportamiento general de CL

Como se estudió en los capítulos 2 y 3 se cuenta con diferentes versiones de TCP, que dependen en algunas ocasiones en como TCP detecta congestión en la sub red, esta se hace de forma estimada (TCP Vegas) o reactiva (TCP Reno).

Entre las formas de revisar el comportamiento de la interacción de TCP sobre OBS, se encuentran las siguientes:

- Impacto de los parámetros de ensamble sobre el *throughput* TCP.
- Impacto de la inclusión de la red OBS con y sin cognición sobre la probabilidad de bloqueo.
- Aumento o disminución del número de paquetes retransmitidos (se debe incluir un contador de retransmisiones en cada nodo OBS).
- Activación de los mecanismos para control de flujo y congestión en TCP.

De los aspectos antes mencionados, se puede conocer la probabilidad de bloqueo de los segmentos TCP que se busca enviar a través de la red OBS, se conoce que cuando una ráfaga que contiene diferentes segmentos TCP provenientes de diferentes fuentes se pierde, todas estas fuentes deben buscar la forma de retransmitir estos segmentos. Y cuando la ráfaga transporta segmentos de una sola fuente, el efecto negativo sobre la comunicación es alto. Uno de los problemas que se presentan es por la selección de un valor de ensamble alto (T o B) que puede sobrepasar el valor del retardo de propagación de enlace. Igualmente, se puede penalizar por tener que realizar demasiadas retransmisiones. Se envían procos paquetes teniendo en cuenta los paquetes de los cuales no se ha recibido el ACK respectivo. En general para revisar cómo se comporta TCP sobre OBS se toma la red OBS como un *barebone* o como *backbone*. Debido a los mecanismos que se pueden incluir en la red OBS (plano de control) se trabaja con OBS *backbone*.

La pérdida de una ráfaga con muchos segmentos TCP conduce al estado de *slow start* ya que todos los segmentos de la *cwnd* se pierden y se presenta congestión severa.

Se procede a realizar escenarios de comportamiento para TCP sobre OBS de la siguiente forma:

- Se implementa un modelo de simulación estilo *back to back*, en este caso se crean una fuente (*source*) y un sumidero (*sink*) TCP de acuerdo con lo descrito en la sección 4.3.6. en este caso la pérdida de información es muy baja ya que se conectan directamente *host to host*. De todas formas, este modelo se emplea para ajustar los mecanismos de acuerdo con el comportamiento que debe exhibir TCP.

- En seguida se procede a incluir la fuente TCP (cliente) y el sumidero TCP (servidor) como elemento de generación de información en los nodos de borde o frontera OBS, para esta ocasión, la red OBS no posee ningún mecanismo basado en meta heurísticas o cognición. Retomando la figura 3.16 y recreándola en la figura 4.67, se aprecia mejor el proceso de interacción TCP/OBS.

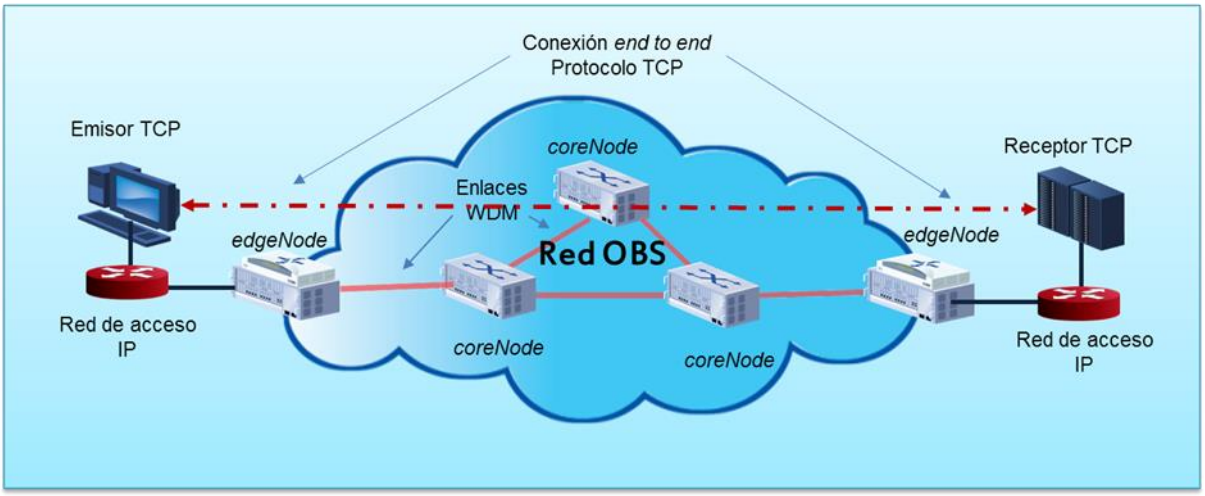


Figura 4.67. Modelo de interacción TCO/OBS (López 2014)

La prueba inicial se realiza sobre la red OBS TEST de cuatro (4) nodos totalmente conectada.

Después se realiza la prueba con NSFNeT1 y EON. Se obtienen los resultados y se grafican. Tabla 4.30 y figura 4.68, se evidencia un comportamiento esperado para una red con topología irregular como EON (con 26 nodos/51 enlaces), su BP se incrementa respecto a NSFNeT1 y en TEST es un comportamiento casi ideal.

	BP TCP/TEST (4/6)	**BP TCP/NSFNeT1 (14/21)**	**BP TCP/EON (26/51)**
0,002	0,0012	0,016826	0,02812
0,004	0,0023	0,01767	0,03182
0,006	0,0237	0,02129	0,03731

Tabla 4.30. Valores para un escenario basado en la definición para NSFNeT1

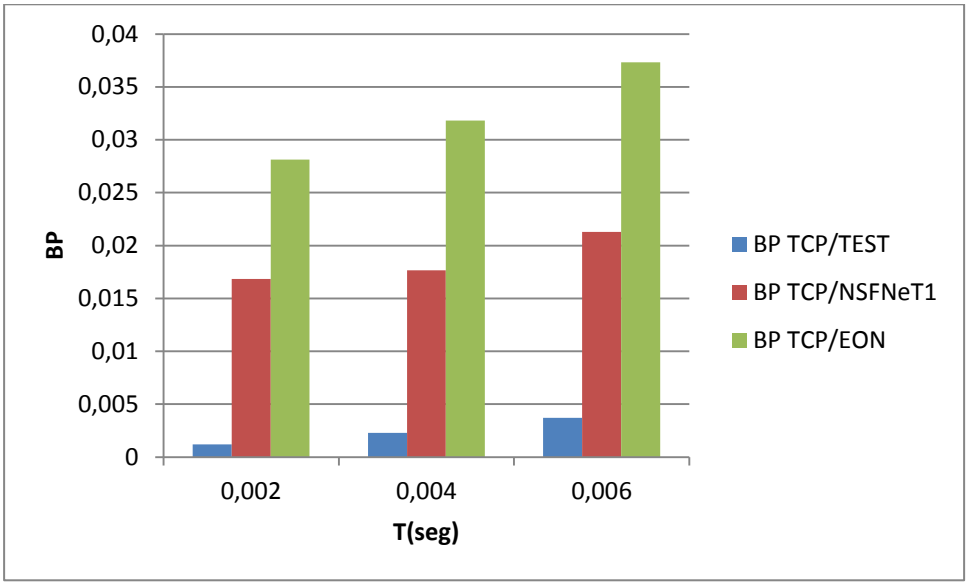


Figura 4.68. Muestra comparativa entre tres topologías para el soporte de TCP

- En seguida, se incluye la red OBS con GA y GA+COG, sobre una misma gráfica con las mismas condiciones (escenario de simulación) para la red OBS se realiza una gráfica comparativa que se muestra en la figura 4.69. La tendencia se mantiene, cuando se prueban escenarios con meta heurísticas y cognición se presenta una mejoría en el comportamiento de BP.

- Finalmente se prueba el diseño del *Cross Layer* con elementos de notificación explicita de congestión desde OBS hacia TCP para resolver el problema de falsa congestión. Otra manera de revisar el efecto de OBS sobre TCP es mediante el

uso de estimadores (evaluadores) del estatus de congestión. Se realiza una comparación preliminar entre realizar la detección de congestión sin notificación explicita (se emplea RTT como sensor de la congestión en la red) y el caso en el cual se realiza la **notificación explicita de congestión** como en los mecanismos empleados en *Frame Relay* para control de congestión se puede emplear FECN (*Forward Explicit Congestion Notify*) y BECN (*Backward Explicit Congestion Notify*). Para efectos de CL el empleo de notificación explicita de congestión es más compatible.

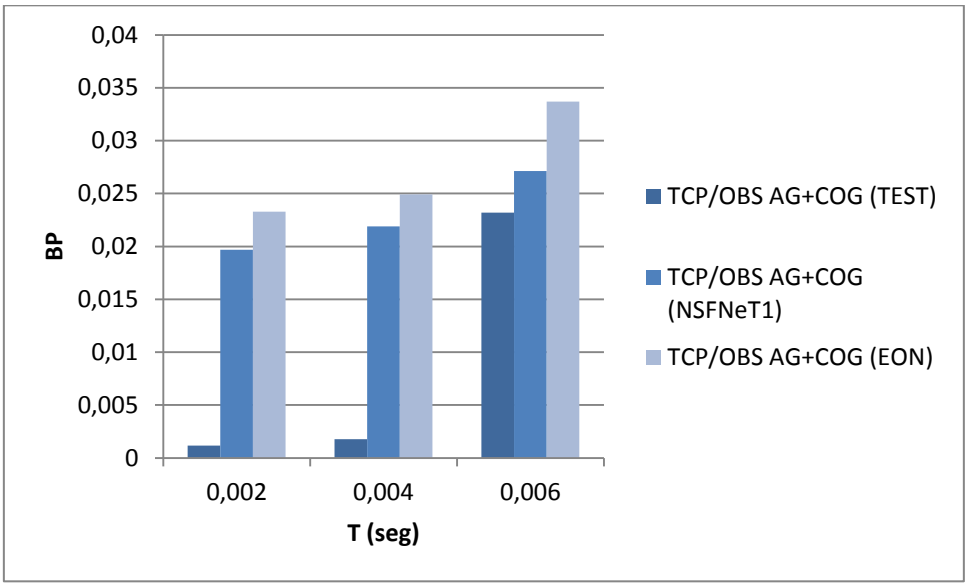


Figura 4.69. Probabilidad de Bloqueo para tres (3) escenarios

Finalmente, tomando las estadísticas para las medidas de Througput TCP en Mbps en los terminales Host (cliente) y Host (servidor/sink), las medidas se hacen con servicios de tipo **Unicast** (el caso multicast representa un buen reto de investigación). Por lo general se busca que RTT sea pequeño para lograr una velocidad mayor, por ejemplo para un RTT de 50ms el Througput TCP puede ser de 10Mbps para un tamaño de ventana de 64Kbytes (valores típicos). $Throughput = Buffer\ Size/RTT$.

Se concluye con la gráfica 4.70 en la cual se muestra la medida del *Throughput* TCP vesus la probabilidad de bloqueo de ráfaga. Para esto se toma un modelo desarrollado con AG y Cognición como prueba y con notificación explicita de congestion. Una vez que se presenta un aumento en la BP se puede notificar a TCP

de lo ocurrido, sin embargo se evidencia la degradación del Throughput TCP en la medida que aumenta la BP.

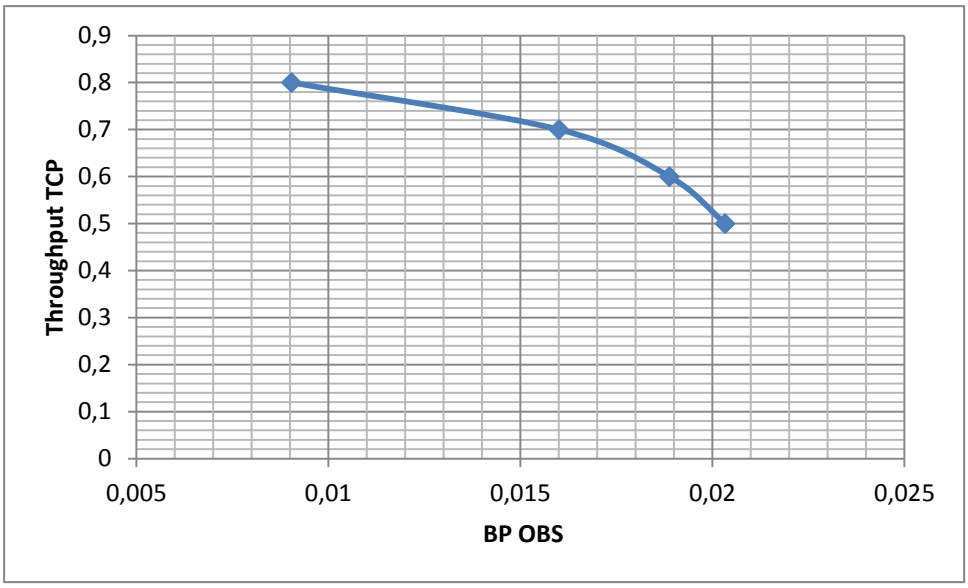


Figura 4.70. Degradacion de Throughput TCP con el aumento de BP (AG+COG)

Aunque es de esperarse este comportamiento, la inclusión de notificación por *Cross Layer* retarda la degradación del *througphput* pero no la evita. La gráfica es concluyente en cuanto a un comportamiento puntual que esta acorde con la literatura al respecto, pero ante la posibilidad de nuevos escenarios y redes OBS con otras topologías es un ítem que puede ser objeto de un trabajo de grado con nivel de maestría (por ejemplo).

4.7. Conclusiones del Capítulo

- La implementación de meta heurísticas de acuerdo con los resultados obtenidos puede ayudar a mejorar el desempeño de una red OBS con las condiciones y restricciones definidas, y bajo las mismas definiciones para los distintos escenarios obtenidos, se debe partir siempre de la misma configuración básica.

- Los escenarios implementados y las pruebas realizadas muestran que una vez identificada la funcionalidad de la red OBS susceptible de introducir meta

heurísticas y cognición, la probabilidad de bloqueo disminuye a partir de determinado tiempo de simulación.

- Una vez se han realizado las diferentes pruebas surgen una serie de posibilidades para probar con otros métodos cognitivos basados en otras meta heurísticas, por ejemplo empleo de BCO (*Bee Colony Optimization*), en Talbi (2009) existe un gran abanico de opciones que pueden ser probados en diferentes escenarios OBS.

- En principio aunque GA y ACO no son consideradas como métodos cognitivos. Aunque estos poseen principios de memoria y la posibilidad de aprender de la experiencia mediante el uso de soluciones obtenidas para generar otras nuevas.

- Según lo que se requiera las meta heurísticas pueden ser iterativas, repetitivas como GA y constructivas repetitivas como ACO. O la combinación de las mismas. Cada una tiene una aplicación específica y unos resultados propios.

- De la observación de las gráficas se puede concluir que solo al incluir GA en la solución se evidencia una mejoría del caso típico sin meta heurísticas, igualmente se observa como al introducir el método cognitivo la PB se disminuye aceptablemente.

- La inclusión en la función de aptitud de parámetros que indicen en la probabilidad de bloqueo de la red como el número de enlaces por nodo, las longitudes de onda disponibles, el número de saltos de una ruta y los nodos del camino de origen a destino, son un factor fundamental para garantizar la convergencia del algoritmo genético hacía buenas soluciones.

- El establecimiento correcto de los valores de aptitud umbrales durante el inicio e iteraciones del AG, son factores de diseño esenciales para obtener rutas óptimas; Al escoger un umbral bajo, las rutas resultantes pueden tomar valores que estarían dentro del rango de las soluciones, pero cuyas funciones de aptitud resultan ser mediocres; o bien, si el umbral es muy alto, el valor de aptitud establecido como criterio de parada podría ser inalcanzable.

- Se observa también como la red OBS con el GA con el método de control cognitivo usa menor tiempo de procesamiento, esto ocurre debido a que la información almacenada en el vector de rutas cognitivas puede contener soluciones aptas para la generación de las siguientes ráfagas, evitando que el algoritmo genético posiblemente tenga que realizar una o más iteraciones antes de generar la ruta apta. Por otra parte, aunque el método de control cognitivo emplea dos funciones dentro del algoritmo genético (llenado del vector de rutas y validación de la(s) rutas del vector en la etapa primera etapa del algoritmo genético), si los resultados almacenados resultan ser aptos como solución, el tiempo de procesamiento debido a las iteraciones que puede evitar el algoritmo es mayor que los métodos de la base de información cognitiva.

- Se observa igualmente como el comportamiento de la probabilidad de bloqueo al variar el número de generaciones del algoritmo genético, es inversamente proporcional, independientemente del método heurístico examinado. Sin embargo, para todos los resultados analizados, la red que usa el método de control cognitivo muestra un mejor desempeño y se observa que a mayor número de generaciones, la diferencia entre las probabilidades de bloqueo de las dos redes se hace mayor. Bajo estos criterios, la red OBS que usa la base de información cognitiva presentará mejores resultados en el 100% de los casos, manejando un margen de confiabilidad del 85%.

- La inclusión de un módulo de control en el generador de ráfagas *burstifier* promete una mejoría en los procesos autónomos para elegir el método de generación de ráfagas, aunque se puede seguir trabajando sobre el mismo para obtener una versión siguiente.

- Para el caso de la prueba de TCP sobre OBS existe una taxonomía muy amplia, se pudo realizar algunas observaciones de TCP sin *Cross Layer*, es decir con elementos propios del nivel MAC OBS, se observó como con notificación explicita a través de CL se presenta un nivel de bloqueo menor.

- Debido a la naturaleza bufferless de OBS ocurren perdidas de ráfagas con comportamiento aleatorio inclusive con bajo tráfico de entrada. Estas perdidas pueden ser mal interpretadas por TCP en los niveles altos, ocasionando la

degradación del *throughput*. La propuesta de diferentes mecanismos que controlen dichas perdidas o las disminuyan pueden lograr que la operación de TCP no se vea alterada.

- Finalmente, para obtener las pruebas necesarias del desempeño de la red OBS al incluir métodos con control cognitivo basado meta heurísticas, es importante tener en cuenta la gestión dada a la memoria por la herramienta OMNeT++, debido a que el diseño está orientado al manejo de punteros, es necesario liberar cada cierto tiempo la memoria dinámica que se encuentra en uso ya que el no hacerlo conduce a bloqueo en la aplicación y en los equipos de cómputo empleados, igualmente, las versiones preliminares de OMNeT++ para el sistema operativo Windows presenta serias inestabilidades y problemas de *bugs* en el código lo que ocasiona perdida en datos y demora en la depuración del código. Igualmente, es importante contar con equipos de cómputo de buenas prestaciones ya que el peso de las aplicaciones tiende a ralentizar los procesos de simulación.

Capítulo 5

Conclusiones, recomendaciones y Trabajos propuestos

5.1. Introducción

En este capítulo se recopilan las diferentes conclusiones que se han extraído como resultado del desarrollo de la presente Tesis. Consta de dos (2) secciones principales, la primera tiene que ver con las conclusiones sobre el trabajo de Tesis en cuanto a temáticas incluidas, metodologías seguidas, diseños obtenidos, elementos cognitivos, herramienta de simulación empleada y aportes sobre cada ítem incluido. Igualmente, al final de cada capítulo se ha incluido una sección sobre algunas conclusiones obtenidas luego de su desarrollo. Estas sumadas a las consignadas en el presente capítulo conforman las conclusiones del trabajo de Tesis realizado. Es posible que se hayan quedado conclusiones por incluir pero lo interesante del desarrollo de una Tesis doctoral es que en lugar de concluir en un punto, muestra un gran horizonte de posibilidades investigativas.

La segunda parte tiene que ver con las diferentes recomendaciones sobre posibles proyectos a realizar, se recuerda que a partir de esta Tesis se han generado proyectos de trabajos de grado, trabajos a nivel de maestría, temas para futuras Tesis doctorales y proyectos de investigación. Esta sección se incluye ya que una de las ideas que motivó el desarrollo de esta Tesis consistió en crear y fortalecer una línea de investigación en Comunicaciones ópticas al interior del grupo de I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones GNTT de la Universidad del Cauca.

Debido a los objetivos de investigación que tiene el presente trabajo de Tesis fue necesario realizar una búsqueda bibliográfica exhaustiva sobe los temas relevantes que se tratan en la misma. Con este documento se busca dejar una base conceptual suficientemente sólida, una guía de consulta y aprendizaje para los investigadores interesados en la temática de redes OBS y redes OBS cognitivas. Al realizar una lectura de la misma se obtienen los elementos para comprender las temáticas y conocer que pruebas evaluativas se han realizado.

Finalmente, la realización de diferentes modelos y escenarios de trabajo constituyen una labor compleja en la medida que al realizar cualquier cambio de parámetros en un escenario en particular implica generación de nuevos datos, análisis. Lo cual ha de realzarse para cada escenario considerado.

5.2. Conclusiones

5.2.1. Sobre la Tesis (metodología seguida, temáticas tratadas y aportes realizados)

5.2.1.1 Respecto a las metodologías empleadas

Las adaptaciones metodológicas ayudan a refinar procesos de diseño y prueba, igualmente, permiten mediante una serie de pasos obtener unos modelos de prueba que pueden ser empleados en la solución de los problemas planteados y cumplir con las hipótesis propuestas. Se busca que no sean una camisa de fuerza y que sean útiles como herramientas. Así mismo, en el desarrollo de esta Tesis se han probado diferentes opciones metodológicas en el desarrollo del trabajo, en los diseños de red y en los procesos de simulación. Se concluye con constituye un buen aporte para ordenar eventos y resultados.

5.2.1.2. Respecto a la elección de la herramienta de Simulación

La elección de OMNeT++ puede considerarse como un acierto en cuanto a las características que brinda para la construcción de modelos de simulación. Sin embargo es una herramienta que exige un conocimiento en programación orientada a objetos en C++ y en principio requiere de un proceso de familiarización fuerte,

además en la versiones para 4.4.2 para Windows 8 presenta problemas de inestabilidad bloqueos y bugs que no se evidencian solo hasta que depuras paso a paso el código. Sin embargo se recomienda OMNeT++ pero con un proceso de capacitación previo.

5.2.1.3. Respecto a los aportes realizados

Además de los aportes listados en la introducción al presente documento de Tesis, se listan otros aportes que se han ido obteniendo en la medida que ha transcurrido el desarrollo del presente trabajo. Se resumen los siguientes:

- Se propone un modelo de arquitectura cognitiva ARCO para su evaluación y adaptación.

- Se propone un estudio y un modelo *Cross Layer* en principio que no altera la disposición en capas de las arquitecturas actuales, pero que sirve de inicio para proponer modelos CL que rompen las normas respecto a los modelos en capas jerárquicos.

- Se realizó un análisis de QoS que puede tomarse como base para proponer un modelo QoS para redes por conmutación óptica.

- Se propone el empleo de una metodología de simulación adaptando algunas fases.

- Se propone el empleo de la metodología *Top Down Network Design* adaptada a redes WAN OBS.

- Se proponen diferentes métodos cognitivos y empleo de meta heurísticas para ser incluidas en los módulos de borde y centrales. El objetivo ha sido usar meta heurísticas y la cognición para mejorar el desempeño de la red OBS. Es el caso de AG, ACO y PSO.

- Aunque algunas veces se menciona a las redes WROBS en el desarrollo de la Tesis, se considera que debido a su naturaleza centralizada, puede ser objeto de

otro posible trabajo de grado. El mismo hecho de ser una arquitectura no distribuida puede causar dificultades para desplegar redes WAN sobre WROBS.

5.2.2. Sobre el desarrollo del trabajo de investigación

5.2.2.1. Conclusiones sobre el comportamiento del tráfico en redes OBS

- El tráfico IP sobre OBS tiende a presentar dependencia *long range*, para escalas medias se observa autosimilitud o comportamiento por ráfagas. Igualmente, cuando OBS es empleado en redes WAN como en este caso, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos al tratar con transporte de información TCP.

- **Retardo de ensamble**, como se está transportando tráfico TCP, los procesos de ensamble de ráfagas adicionan retardos variables al RTT (*Round Trip Time*) el cual afecta el desempeño extremo a extremo. Este aspecto se revisa y analiza a partir del uso de determinado mecanismo de ensamble de ráfaga. En principio se realizan pruebas para lograr un valor de tiempo T y B que permitan un buen desempeño del enlace y proporciones un mejor *goodput*. De otro lado se prueba con mecanismos que permitan adaptar dinámicamente los valores de T y ajustar el tamaño de la ráfaga para que los retardos no afecten el transporte de los datos y sean tolerados por los niveles TCP/IP, se busca que dichos retardos de ensamble no disparen procesos de control de flujo y de congestión en el nivel TCP. Se prueba entonces con mecanismos estáticos y dinámicos para comparar el desempeño de los mismos.

- **Pérdida de ráfagas**, es otro de los aspectos que pueden degradar el desempeño extremo a extremo de la red. La principal causa de perdida de ráfagas se debe al comportamiento que tengan los nodos tipo *core*, es decir se debe a la contención presentada, a los métodos de planificación empleados y a la eficacia de los métodos de control de contención. Se busca contar con algoritmos de enrutamiento eficientes al igual que procesos de planificación y diseño que permitan una distribución del tráfico por las diferentes rutas en la red y evitar la concentración de tráfico en algunos nodos y enlaces. Es importante destacar que para evitar que se pierda información de diferentes conexiones en el presente trabajo se emplean mecanismos de agregación que incluyen asignación de

prioridades o clases de servicios, una vez que se recibe cada paquee IP en el nodo de ingreso se realiza un proceso de clasificación por dirección de destino y clase o prioridad asignada a los paquetes IP que transportan los segmentos TCP (proceso conocido como *per-flow burstification*), esto evita además la realización de procesos de sincronismo de flujos. Esta correlación muestra un mejor comportamiento lo cual permite compensar los retardos ocurridos durante el ensamble de las ráfagas.

- **Algoritmos de planificación**, estos mecanismos tienen un alto impacto sobre el aumento del *jitter* y la llegada en desorden de los paquetes cuando se emplea deflexión de ruta y FDL. Igualmente cuando las ráfagas son muy largas aparecen los retardos de ensamble y posibles retardos al no lograr emplear los espacios disponibles para programar el envío de las ráfagas (modelo *void filling*).

- **Evaluación del desempeño**, los modelos propuestos permiten evaluar el desempeño extremo a extremo de una red WAN OBS y su impacto sobre el *througput* TCP. Es importante dejar como posible escenario de prueba, el cambiar de modelos TCP para mejorar dicho desempeño. El modelo de simulación se configura con los siguientes valores: Ancho de banda de acceso en Gbps (valores típicos), en los enlaces hacia el *core* se toman diferentes valores de ancho de banda, entre 2.5Gbps y 10Gbps.

5.2.3. Sobre la inclusión de métodos Cognitivos en redes OBS

- La inclusión de métodos cognitivos en esta clase de redes permite en principio conocer el funcionamiento en detalle de cada componente de la red OBS, de esta forma se puede obtener la información que permita definir en cuales nodos, sub módulos y módulos se tiene la opción de incluir cognición.

- Los resultados obtenidos muestran una mejoría en el comportamiento de los diferentes modelos de red OBS obtenidos y probados. La cognición evidencia una tendencia a la mejora en cuanto a la probabilidad de bloqueo.

- La inclusión de meta heurísticas abre un gran abanico de opciones de posibles trabajos de grado, tesis y proyectos de investigación. Una vez se conoce y prueba

la tecnología OBS con elementos cognitivos se piensa en diferentes posibilidades para aplicar meta heurísticas y cognición.

- El presente documento muestra un mayor énfasis en el caso de AG, siendo la meta heurística sobre la que se realizaron la mayor cantidad de pruebas. Luego con escenarios probados y métricas obtenidas se utilizó como modelo para la realización de los otros métodos.

- La evolución de las redes hacia modelos autónomos adaptativos puede resolver problemas de ineficiencia en la configuración y gestión de la red. Lo que implica que al introducir inteligencia en las redes ópticas OBS es posible conseguir una red que cumpla con los diferentes *self-x* es decir: *self-awareness*, *self-management*, y *self-healing* permitiendo la introducción del paradigma de interconexión de redes cognitivas o *cognitive networking*.

- Se considera que aunque se han hecho muchos avances en esta área, quedan muchos aspectos por revisar y evaluar, los procesos de estandarización de soluciones todavía están pendientes, lo que se busca es unificar criterios alrededor de ciertas problemáticas de estas redes y proponer modelos de desarrollo más globales.

5.2.4. Sobre la inclusión de diseño orientado a *cross layer* (nodos, red y con otros protocolos)

- Respecto al trabajo con CL la realización de pruebas y estudios experimentales aun deja muchas incógnitas por resolver. Entre ellas: lo relacionado con el número de observaciones para las pruebas. El ruido que se puede generar al realizar pruebas. El grado de complejidad de los modelos desarrollados. Certeza sobre el modelo de CL empleado. Los mecanismos para transporte de información. La especificación formal de interfaces y nuevos niveles. Al incluir métodos de cognicion se deben considerar los efectos causados por el empleo del conocimiento adquirido.

- Las medidas de los tiempos de reacción de los protocolos y el reporte a tiempo entre niveles debe en lo posible emplear mecanismos de comunicación muy

simples ya que cualquier sofisticación puede causar más problemas que soluciones.

- En algunos trabajos revisados sobre la simulación de TCP sobre OBS se demuestra como el tamaño máximo de la ráfaga medido en Bytes puede ser calculado mediante la siguiente ecuación:

$$Tamaño\ Maximo\ de\ rafaga\ [bytes] = (Timeout\ [seg]) * (Ancho\ de\ Banda\ del\ enlace[bps])/8$$

- Es decir que el umbral de tiempo para la construcción de las ráfagas es igual a tiempo que demora la ráfaga en transmitirse por un enlace. Igualmente se observa como los mecanismos típicos para control de congestión en redes TCP afectan el funcionamiento de una red OBS. Se puede medir el tamaño de la ventana de congestión mediante los valores de tráfico o caudal actual y el esperado, y como el flujo de datos está limitado por la ventana de congestión TCP. Lo cual está acorde con la teoría sobre los mecanismos de control de flujo y congestión en TCP.

- Es posible observar la interacción entre los mecanismos de control de congestión y de control de flujo sobre la red OBS. Se puede obtener una gráfica que relaciona el tamaño de la ventana TCP con el tamaño de las ráfagas enviadas y con ello se observa la importancia e influencia que tiene la ventana de congestión cwnd (en cuanto a su tamaño), se puede observar como al aumentar el tamaño de la ventana de congestión por encima del tamaño máximo de ráfaga, el sistema entra en fase de congestión.

- Se puede comprobar como al aumentar el tamaño de las ráfagas, esto conduce a la disminución en la pérdida de paquetes en la red, lo anterior puede deberse a que al aumentar el tamaño de la ráfaga, van a circular menos ráfagas por la red OBS con las mismas condiciones de tráfico, y por lo tanto la contención puede disminuir (esto influye en el aumento del troughput).

- Es posible entonces encontrar la relación existente entre la sub red OBS y TCP especialmente entre la ventana de congestión cwnd y el tamaño máximo de la ráfaga, es de notar que cuando se aumenta el número de fuentes IP con distintas

condiciones se trabaja con tamaños diferentes de cwnd y por lo tanto será necesario ajustar los tamaños de los umbrales para las ráfagas OBS con el fin de no deteriorar el caudal y aumentar el número de paquetes (o ráfagas) perdidas.

- Finalmente, a manera de conclusion, la tabla 5.31 que aparece al final del capítulo presenta una muestra comparativa de diferentes trabajos consultados que han servido de insumo para elaborar esta Tesis. Se definen los siguientes parámetros que muestran la pertinencia de los referentes consultados con el desarrollo propuesto en la Tesis: el primero de ellos hace referencia al enrutamiento y asignación de longitud de onda en redes ópticas (RWA) (Chen & Modiano 2003), el segundo parámetro corresponde al Ensamble de Ráfagas (BA), las meta heurísticas (MH) (Talbi 2009), la conmutación ópticas de ráfagas (OBS) (Qiao & Yoo 1999) que agrupa conjuntos de paquetes con características similares para enviarlos a través de la red, la cognición en redes ópticas (CRO) (Tomkos *et al.* 2012), que otorga a la red capacidad de adaptación y "autoconciencia", la Probabilidad de Bloqueo (PB), como principal medida de desempeño y por último, la inclusión del simulador modular de eventos discretos orientado a objetos OMNeT++ (OMN). Se concluye que aunque existen muchos documentos sobre trabajos desarrollados en el área, aun quedan muchos aspectos por tratar y en los que este trabajo de Tesis se propone hacer un aporte.

5.3. Recomendaciones

- Realizar pruebas con Colonia de Abejas BCO (*Bee Colony Optimization*), para demandas de conexión (RWA), cada fuente de alimento se puede tomar como una posible ruta entre un nodo fuente y un nodo destino, se conoce que las abejas buscan mayormente las fuentes con mas alto valor de néctar, entonces mediante un función *fitness* adecuada se puede encontrar la ruta óptima entre las existentes.

- Realizar R+WA mediante ACO y WA mediante el empleo de otra metaheurística, o incluir en ACO la selección de la longitud de onda. Se considera que es un ejercicio interesante dado que implica una función de selección de ruta (e

incremento de feromona) y la selección de la longitud de onda para el camino con mayor feromona.

- Se recomienda realizar pruebas para obtención de *Goodput* en TCP sobre OBS sobre más variables, por ejemplo, probar con diferentes valores de lambdas disponibles, y la posible inclusión de mecanismos de control de contención cognitivos. Este ultimo aspecto es importante definir cual puede ser método de contención que tiene un mejor comportamiento en los diferentes escenarios.

- Igualmente, se recomienda la realización de pruebas con mecanismos de cognicion en modelos de redes creados sobre otros entornos de simulación con el objeto de evaluar las bondades de otras herramientas diferentes a OMNeT++, se propone el empleo de NS3 y OPNET.

- De otro lado, esta sección muestra una serie de propuestas de investigación cuyo objetivo central es lograr la consolidación en principio del área de investigación en redes de comunicación ópticas, puntualmente en redes OBS, arquitecturas cognitivas, métodos heurísticos y cognitivos y por supuesto sobre diseño orientado a *Cross Layer*, posteriormente se espera que cada idea se cristalice en un proyecto de investigación ya sea para presentar ante instancias nacionales de ciencia y tecnología; ante entes mundiales que apoyen estas iniciativas; y también puedan convertirse en trabajos de grado de pregrado y maestría, así como en Tesis doctorales en el área como apoyo a los programas de ingeniería electrónica y telecomunicaciones, maestría en ingeniería electrónica y telecomunicaciones y doctorado en ciencias de la electrónica. Finalmente, esta Tesis se espera que se constituya en un aporte válido a los posibles lectores que tengan interés en impulsar esta área en el País especialmente en las diferentes IES con programas afines.

5.3.1. Listado de posibles iniciativas de proyectos

5.3.1.1. Proyectos en el área de redes OBS (P-OBS)

- Análisis de la incidencia de los efectos lineales y no lineales en el desempeño de una red OBS con nodos distribuidos.

- Modelado de una red OBS con control centralizado, analizar el desempeño en entornos MAN y WAN respecto a los procesos de atención a requerimientos de conexión extremo a extremo.

- Realizar un análisis comparativo entre OBS y WROBS en cuanto a RWA y métodos de ensamble de ráfagas.

5.3.1.2. Proyectos en el área de redes y arquitecturas cognitivas (P-ACOG)

- Análisis Comparativo entre arquitecturas propuestas (bases conceptuales).

- Definición de pruebas para la arquitectura propuesta ARCO. Existen diferentes propuestas de arquitecturas cognitivas, se propone aplicar esta arquitectura en otras clases de redes susceptibles de un enfoque cognitivo.

- Definición de un lenguaje de descripción cognitivo para la arquitectura propuesta, para el caso puntual de ARCO, se requiere definir los mecanismos para intercambio de información entre los diferentes modulos que la componen, se propone trabajar con XML o definir un lenguaje a partir de formas canonicas tipo BNF, o en su defecto emplear los proceso de comunicación empleados en SNMPv1 (set, get y trap).

- Proponer un modelo de red completo ajustado a la arquitectura cognitiva expuesta.

- Diseño y prueba de un agente inteligente que permita el control de los recursos de longitudes de onda es decir que pueda tomar decisiones sobre cual método de selección de longitud de onda es más conveniente en un instante determinado de la operación de los nodos.

5.3.1.3. Proyectos sobre redes OBS cognitivas (P-OBSCOG)

- Proponer métodos cognitivos para los procesos de control de contención.

- Proponer métodos de control cognitivos para la atención del proceso de procesamiento del BCP.

- Proponer mediante el empleo de meta heurísticas orientadas a población, procesos para optimizar procesos de comunicación *interworking* OBS.

- Proponer mediante el empleo de Artificial Bee Colony, una solución para RWA en redes OBS.

- Empleo de lógica difusa FL (*Fuzzy Logic*) para encontrar los valores óptimos de B, B_{min} y T en redes OBS con nodos distribuidos.

5.3.1.4. Proyectos sobre diseño orientado a *Cross Layering* (P-CL)

- Diseñar y modelar una propuesta de *Cross Layer* no orientada a arquitecturas por niveles.

- Proponer un modelo de *Cross Layer* orientado a procesos de comunicación entre el nivel físico.

- Proponer un modelo tipo *merge* para CL de TCP/IP sobre OBS, comparar en cuanto a métricas de desempeño con el modelo típico *overlay*.

5.3.1.5. Proyectos sobre aplicaciones de OBS (P-AOBS)

- IMS (*IP Multimedia Subsystem*) sobre OBS. Si OBS es la red de transporte para IP, entonces IMS puede convivir con OBS para crear un entorno IMS como soporte a las redes de Nueva (o Siguiente) Generación NGN (*Next Generation Networks*).

- Procesos de migración a OBS en el entorno de las telecomunicaciones en Colombia. Determinar posibles escenarios de migración en Colombia hacia OBS, se puede intertar proponer un modelo de migración desde MPLS.

- SIP como plano de control en OBS. Como en el caso de IMS, SIP puede constituirse como el plano de control a través de la implementación de métodos SIP para el control de funciones en el entorno OBS.

5.3.2. Clasificación de las propuestas

La tabla 5.1 muestra una clasificación sugerida sobre las ideas de proyectos descritas en la sección anterior, esto se hace con el ánimo de orientar al investigador interesado y ofrecer un conjunto de ideas que pueden servir como marco para generar otras nuevas.

Ítem	Trabajo de grado de pregrado	Trabajo de grado de Maestría	Trabajo de grado de Doctorado	Proyecto de investigación general
P-OBS	x		x	
P-ACOG		x	x	
P-OBSCOG	x		x	
P-CL		x		
P-AOBS	x	x		x

Tabla 5.31. Clasificación sugerida sobre las propuestas realizadas

Elementos considerados y referencias	RWA	BA	MH	OBS	CRO	PB	OMN
Puche *et al.* (2008)	A	A	A	F	A	D	A
Battistelli & Perros (2003)	D	A	A	F	A	A	A
Rodríguez & Saavedra (2010)	F	A	F	A	A	F	A
Lázaro (2010)	F	A	D	A	A	F	A
Bhanja, Mahapatra, & Roy (2010)	F	A	M	A	A	F	A
Barradas (2009)	F	A	A	F	A	D	F
Kavian *et al.* (2011)	F	A	F	A	A	A	A

Zervas & Simeonidou (2010)	M	A	A	A	F	A	A
Gond & Goel (2010)	M	A	A	A	A	F	A
Binh & Tu (2009)	F	D	A	A	A	F	F
Le *et al.* (2005)	F	A	F	A	A	F	A
Kavian (2010)	F	A	F	A	A	D	A
Nakkeeran, Vivek & Kota (2004)	F	A	F	A	A	F	A
Bisbal *et al.* (2004)	F	A	F	A	A	F	A
Trong *et al.* (2005)	F	A	F	A	A	F	A
De Miguel *et al.* (2004)	F	A	F	A	A	M	A
Kozlovski (2003)	M	D	A	F	A	F	A
Barradas & Medeiros (2008)	F	A	A	F	A	M	F
Espina *et al.* (2010)	A	D	A	F	A	A	F
Duran *et al.* (2011)	M	D	F	A	F	F	A

Tabla 5.2. Muestra comparativa de algunos trabajos consultados

Referencias Bibliográficas

Agrawal, A, El-Bawab, T & Sofman, L 2005, 'Comparative Account of Bandwidth Efficiency in Optical Burst Switching and Optical Circuit Switching Networks', *Photonic Network Communications*, vol. 9, no. 3, pp. 297-309.

Agrawal, G 2001, *Nonlinear Fiber Optics 3rd Edition*, ACADEMIC PRESS, USA.

Amanna, A & Reed, J 2010, Survey of cognitive radio architectures, *in Proceedings of the IEEE SoutheastCon Conference: Energizing Our Future*, pp. 292–297, Charlotte, NC, USA, March.

Amin, A, Nishimura, K, Shimizu, K, Takenaka, M, Tanemura, T, Onaka, H, Hatta, T, Kasukawa, A, Tsuji, S, Kondo, Y, Urino, Y, Uetsuka, H & Nakano, Y 2009, ´Development of an Optical-Burst Switching Node Testbed and Demonstration of Multibit Rate Optical Burst Forwarding´, *Journal of Lightwave Technology,* vol.27, no.16, pp.3466-3475, August 15.

Anan, M, Chaudhry, G & Benhaddou, D 2006, Architecture and Performance of A Next-Generation Optical Burst Switch (OBS), *3rd International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems, BROADNETS 2006*, vol., no., pp.1,9, 1-5 October.

Antonino A, Birke, R, De Feo, V, Finocchietto, J, Gaudino, R, La Porta, A, Neri, F, & Petracca, M 2007, 'The WONDER Testbed: Architecture and Experimental

Demonstration', *Proceedings of the European Conference on Optical Communication (ECOC)*.

Assi, C, Shami,A, Ali, M, Kurtz, R & Guo, D 2001, ´Optical networking and real time provisioning: an integrated vision for the next-generation Internet´, *IEEE Network*, vol.15, no.4, pp.36,45, July/August.

Atallah, M 1998, *Algorithms and Theory of Computation Handbook*, CRC Press, Boca Ratón, FL.

Azodolmolky, S. Tzanakaki, A & Tomkos, I. 2006 ´Study of the Impact of Burst Assembly Algorithms in Optical Burst Switched Networks with Self-Similar Input Traffic´, *Transparent Optical Networks, 2006 International Conference* on , June, vol.3, no.1, pp.35-40.

Baldine, I, Rouskas, G, Perros, H & Stevenson, D 2002, ´JumpStart: A Just-In-Time Signaling Architecture for WDM Burst-Switched Networks´, *IEEE Communications Magazine*, February, vol. 40, no. 2, pp. 82–89.

Bandyopadhyay, S 2008, *Dissemination of information in optical network: From Technology to Algorithms*, Springer, Berlin Heidelberg.

Banerjee, D & Mukherjee, B 2000, Wavelength-routed optical networks: Linear formulation, resource budgeting tradeoffs, and a reconfiguration study, *Journal IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.8, pp. 598-607.

Banerjee, S, Yoo, J & Chen, C 1997, ´Design of wavelength routed optical networks for packet switched traffic´, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 9, pp.1636-1646, September.

Bannister, J, Fratta, L & Gerla, M 1990, Topological design of the wavelength-division optical network, INFOCOM, *Ninth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communication Societies, The Multiple Facets of Integration, Proceedings, IEEE*, vol. 3, pp.1005-1013.

Baroni, S & Bayvel, P 1997, Wavelength requirements in arbitrarily connected wavelength-routed optical networks, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, pp. 242-251, February.

Barpanda, R, Turuk, A, Sahoo, B & Majhi, B 2011, Genetic Algorithm techniques to solve Routing and Wavelength Assignment problem in Wavelength Division Multiplexing all-optical networks, *Communication Systems and Networks (COMSNETS, Third International Conference*.

Arima, S, Tachibana, T, Kaji, Y & Kasahara, S 2007, FEC-Based Reliable Transmission for Multiple Bursts in OBS Networks*,* *Journal IEICE Transactions*, vol. 90-B, no. 12, pp.3541-3551.

Balamuralidhar, P & Prasad, R 2008, A context driven architecture for cognitive radio nodes, *International Journal of Wireless Personal Communications (Springer),* Vol. 45 (3), pp 423- 434, May.

Baldo, M & Zorzi, M 2007, Cognitive Network Access using Fuzzy Decision Making, in Proc. Of the 1 IEEE CogNet2007 WorkShop, Communications, Glasgow, UK, June.

Barradas, A & Medeiros, M 2008, Pre-Planned Optical Burst Switching Routing 243 Strategies, *Proceedings of the 2nd ICTON Mediterranean Winter (ICTON-MW),* Marrakesh, December.

Barradas, A & Medeiros, M 2008, An OMNeT++ Model for the Evaluation of OBS Routing Strategies, OMNeT++ 2008, *Proceedings of the 1st International Workshop on OMNeT++ (hosted by SIMUTools 2008*), Portugal, March.

Barradas, A 2009, Quality of Service in Optical Burst Switching Networks´, Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Electrónica e Informática, Universidad de Algarve, Faro, Portugal, Novembro.

Battistelli, T & Perros, H 2003, An introduction to optical burst switching, *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, pp. 10-15, August.

Battistelli, T & Perros, H 2005, ´Optical Burst Switching: A survey´, Computer Science Department, North Carolina State University Raleigh, NC, January.

Belbekkouche, A, Hafid, A & Gendreau, M 2009, ´Adaptive Routing and Contention Resolution approaches for OBS networks with QoS differentiation´, *Sixth International Conference on Broadband Communications Networks and Systems,* vol., no., pp.1-8, 14-16 September.

Bellman, R 1958, *on a routing problem*, Quarterly Applied Mathematics, vo. 16, pp.87–90.

Ben, G, Khan, B, Battou,A, Guizani, M & Chaundhry, G 2002, Routing Protocols for Optical Netwoks, www.academia.edu.

Beni G & Wang J 1989, Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems, *Proceedings of the NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems*, Il Ciocco, Tuscany, Italy, June 26- 30.

Bertsekas, D 1998, *Network Optimization: Continuous and Discrete Models*, Athena Scientific Post Office Box 391 Belmont, Mass. 02178-9998 U.S.A.

Bhanja, U, Mahapatra, S, & Roy, R 2010, ´A novel solution to the dynamic routing and wavelength assignment problem in transparent optical networks´, *International journal of Computer Networks and Communications*, vol.2, no. 2.

Bhide, NM, Sivalingam, KM & Fabry-Asztalos, T 2001, 'Routing Mechanisms Employing Adaptative Weight Functions for Shortest Path Routing in Optical WDM Networks', *Photonic Network Communications*, vol. 3, no. 3, pp. 227-236.

Binh, L & Tu, V 2009, Routing and Wavelength Assignment and Survivability of Optical Channels in Ultra-high Speed IP over DWDM Networks Under Constraints of Residual Dispersion and Nonlinear Effects, *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, vol.9, no.2, February.

Birman, A & Kershenbaum, A 1995, 'Routing and Wavelength Assignment Methods in Single-Hop All-Optical Networks with Blocking', *Proceedings of IEEE INFOCOM95*,

Boston, MA, vol. 2, pp. 431-438.

Bisbal, D, de Miguel, I, González, F, Aguado, J, Fernández, P, Durán, J, Durán, R, Lorenzo, R, Abril, E & López, M 2004, Dynamic Routing and Wavelength Assignment in Optical Networks by Means of Genetic Algorithms, *Photonic Network Communications*, vol. 7, no.1, pp. 43-58.

Blumenthal, D, Feuerstein, R & Sauer, J 1994, First demonstration of multihop all-optical packet switching, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.6, no.3, pp.457,460, March.

Blum, A & Mitchell, T 1998, Combining labeled and unlabeled data with co-training. *COLT: Proceedings of the Workshop on Computational Learning Theory, Morgan Kaufmann*, pp. 92-100.

Boscovic, D 2006, ´Cognitive Networks´, *Motorola Technology Position Paper*, http://www.motorola.com/mot/doc/6/6005_MotDoc.pdf.

Bouillet, E, Mishra, P, Labourdette, J, Perlove, K & French, S 2002, Lightpath Re-optimization in Mesh Optical Networks, *in 7th European conference on Network & Optical Communications*, vol.13, pp.437-447.

Cankaya, H, Charcranoon, S, & El-Bawab, T.S 2003, ´A preemptive scheduling technique for OBS networks with service differentiation´ *In Proceedings, IEEE Globecom*, pp. 2704–2708.

Cao, X, Li, J, Chen, Y & Qiao, Ch 2003, Assembling TCP/IP Packets in Optical Burst Switched Networks, *GLOBECOMM IEEE*, Taipei, Taiwan, November 17-21.

Capmany, J & Ortega, B 2006, *Redes Ópticas*, Editor: Universitat Politècnica de València; Edición: 1. Valencia, ESP.

Carena, A, Gaudino, R, & Poggiolini, P 2004, 'RingO: An Experimental WDM Optical Packet Network for Metro Applications', *IEEE Journal Sel. Areas Communications*, vol. 22, no. 8, pp. 1561–1571.

Chaing, K, Gurusamy, M, Liu, Y & Hoang, M 2007, *Quality of Service in Optical Burst Switched Networks,* National University of Singapore, Springer, New York.

Chakraborty, G & Choudhury, S 2010, Characteristics of assembled bursts in obs network under correlated input traffic, *Proceeding IEEE AICCSA*, vol. , no. , Hammamet, Tunisia.

Chandra, P, Turuk, A & Sahoo, B 2009, Survey on optical burst switching in WDM networks, 2009 International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), vol., no., pp.83,88, 28-31 December.

Chbat, M & Spalter, S 2010, ´From 100G to 1000G: Is there a straight road ahead?´, *on Optical Communication (ECOC) 36th European Conference and Exhibition*, vol., no., pp.1,16, 19-23 September.

Chen, Y & Verma, PK 2008, 'Secure Optical Burst Switching: Framework and Research Directions', *IEEE Communications Magazine*, vol.46, no.8, pp.40, 45.

Chen, Y, Qiao, C & Yu, X 2004, Optical Burst Switching (OBS): A New Area in Optical Networking Research, University of New York buffalo.

Chen, Y, Hamdi, M & Tsang, D 2001, ´Proportional QoS over OBS network´, *In Proceedings, IEEE Globecom*, November, vol. 3, pp. 1510–1514.

Chen, Y, Hamdi, M, Tsang, D & Qiao, C 2003, ´Proportional differentiation - a scalable QoS approach´, *In IEEE Communications Magazine*, June.

Chen, L & Modiano, E 2003, Efficient Routing and Wavelength Assignment for reconfigurable WDM networks with wavelength converters*, IEEE Infocom*.

Cheng, H & Yang, S 2010, Genetic algorithms with immigrants schemes for dynamic multicast problems in mobile ad hoc networks, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 23, no.5, pp.806-819, August.

Chiaroni, D 1995, ´A novel photonic architecture for high capacity ATM switch applications´, *in Proceedings of the Photonics in Switching conference*, Salt Lake City, UT, April.

Chiaroni, D 2001, ´Status and applications of optical packet switching´, *in Proceedings of 27th European Conference on Optical Communications (ECOC 2001)*, Amsterdam, Netherlands, October.

Chlamtac, I, Fumagalli, A, Kazovsky, L, Melman, P, Nelson, W, Poggiolini, P, Cerisola, M, Masum, Ch, Fong, T, Hofmeister, R, Chung-Li, L, Mekkittikul, A, Sabido, D, Chang-Jin, S & Wong, E 1996, ´CORD: Contention Resolution by Delay Lines´, *IEEE Journal on Selected Areas in communications*, vol. 14, no. 5, pp. 1014-1029.

Chlamtac, I, Ganz, A & Karmi, G 1992, ´Lightpath communications: An approach to high bandwidth optical WANs´, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 40, no.7, pp. 1171–1182.

Choi, J & Kang, M 2005, Dimensioning Burst Assembly Process in Optical Burst Switching Networks, *IEICE Transactions on Communications*, vol. E88-B, pp.3855–3863.

Chong, H, Tang, A & Ng, G 2009, *Integrated Cognitive Architectures: a survey*, Springer Science + Business Media B.V.

Choudhury, S, Paniker, K, Sinha, A, Mukhopadhyay, S, & Debnath, N 2008, ´A proactive burst assembly algorithm for optical burst switched networks´, *IEEE Symposium on Computers and Communications ISCC 2008,* pp.543-548, July 6-9.

Choudhury, S, Ponda, S & Debnath, J 2007, ´Effect of Time Correlation of Sources at the Output of Time Based Burst Assembler in Optical Burst Switched Network´, *on Signal Processing and Information Technology, 2007 IEEE International Symposium*, vol., no., pp.1065-1070, 15-18 December.

Christodoulopoulos, K, Vlachos, K, Yiannopoulos, K & Varvarigos, E 2006,´Relaxing Delayed Reservations: An approach for Quality of Service differentiation in Optical Burst Switching networks´, *OSA Journal of Optical Networking*, vol. 5, Is. 3.

Chu, X, Li, B & Zhang, Z 2003, ´A Dynamic RWA Algorithm in a Wavelength-Routed All-Optical Network with Wavelength Converters´, *in 22nd Annual Joint Conference of*

the IEEE Computer and Communications Societies, INFOCOM 2003, vol.3, pp. 1795-1804, March.

Chua, K, Gurusamy, M, Liu, Y & Phung, M 2007, *Quality of Service in Optical Burst Swithched Networks*, Springer, NY.

Cinkler, T, Marx, D, Larsen, C & Fogaras, D 2000, 'Heuristic algorithms for joint configuration of the optical and electrical layer in multi-hop wavelength routing networks', *proceedings IEEE INFOCOM'00*, vol. 2, pp. 1000-1009.

Cisco Systems 2011, ´Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2010–2015´, February.

Clavero, R 2007, ´Flip-Flops Ópticos basados en Interferómetros Mach-Zehnder Activos con Realimentación´, Tesis Doctoral, UPV España.

Clark, D, Partridge, C, Ramming, J & Wroclawski, J 2003, A knowledge plane for the internet, *SIGCOMM '03 Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, pp.3-10.

Comer, D 1996, *Redes Globales de Información con Internet y TCP/IP, Vol I: Principios Básicos, Protocolos y Arquitecturas*, Prentice Hall, México.

Cookson, AH 1985, *Particle trap for compressed gas insulated transmission systems*, US Patent 4554399.

Coulibaly, Y, Latiff, M, Mohammad, A & Garcia, N 2011, 'The effect of time slot parameters on slotted optical burst switched networks', *17th Asia-Pacific Conference on Communications APCC*, vol., no., pp.625,630.

Coutelen, T, Elbiaze, H & Jaumard, B 2005, ´Performance Comparison of OCS and OBS Switching Paradigms, *in Proc. 7th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2005),* Barcelona (Spain), July.

Cruz, R & Tsai, J 1996, ´Cod: alternative architectures for high speed packet switching´, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 4, pp. 11-21, February.

Damzen, M Vlad, V, Babin, V & Mocofanescu, A 2003, *Stimulated Brillouin Scattering Fundamentals and Applications*, IOP Publishing Bristol & Philadelfia.

Dasgupta, D 1999, *Artificial Immune Systems and Their Applications,* Springer, Verlag, Berlin Heidelberg.

DaSilva & Mackenzie 2007, Cognitive Networks, *CrownCom 2007*, Orlando, FL July 31.

Davik, F, Yilmaz, M, Gjessing, S & Uzun, N 2004, ´IEEE 802.17 resilient packet ring tutorial´, *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 3, pp. 112–118.

Deering, S & Hinden, R 1998, Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Addressing Architecture, RFC 3513, Cisco System.

De Castro, L & Timmis, J 2002, *Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach,* Springer.

De Miguel, I & Duran, R 2009 ´Genetic Algorithm for Joint Routing and Dimensioning of Dynamic WDM Networks´, *Journal of Optical Communications and Networking*, Vol. 1, Issue 7, pp. 608-621.

De Miguel, I, Düser, M & Bayvel, P 2001, ´Traffic Load Bounds for Optical Burst-Switched Networks with Dynamic Wavelength Allocation´*, in Proceedings of the IFIP TC6 Fifth Working Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, February, pp. 209 - 226, Viena.

De Miguel, I, Kozlovski, E & Bayvel, P 2002, Provision of End-to-End Delay Guarantees in Wavelength-Routed Optical Burst-Switched Networks, *ONDM in Proceeding*, pp. 85-100.

De Oliveira, J 2013, ´Towards terabits optical networks, CPqD. http://www.slideshare.net/cpqd/towards-terabit-per-second-optical-networking

De Pedro, L, Aracil, J, Hernandez, J, Garcıa-Dorado, J 2006, 'Analysis of the Processing and Sojourn Times of Burst Control Packets in Optical Burst Switches' *International Conference on Optical Network Design and Modeling*, IEEE ONDM08, pp. 1,3, 12-14.

De Vega, R & Gotz, J, 2004 ´An analytical study of optical burst switching aggregation strategies´, *Proceedings of the 3rd international Workshop on OBS (WOBS)*, San Jose, CR.

DeCusatis, C 2001, 'Dense wavelength division multiplexing for parallel sysplex and metropolitan/storage area networks', *Optical Networks*, vol. 2, no. 1, pp. 69-80.

Detti, A & Listanti, M 2002, ´Impact of Segments Aggregation on TCP Reno Flows in Optical Burst Switching Networks´, *in Proceedings of INFOCOMM*, vol. 3, pp. 1803–1812.

Detti, A, Eramo, V & Listanti, M 2002, ´Performance evaluation of a new technique for IP supporting WDM optical network: Optical Composite Burst Switching (OCBS)´, *IEEE/OSA Journal of Light wave Technology*, vol. 20, no. 2, pp. 154-165.

Develder, C, Van Houdt, B, Blondia, C, Pickavet, M. & Demeester, P 2004, 'Analytical MMAP-based bounds for packet loss in optical packet switching with recirculating FDL buffers', *Photonic Network Communications*, vol. 8, no.2, pp. 149-161.

Dhodhi, M, Tariq, S & Saleh, K 2001, ´Bottlenecks in next generation DWDM-based optical networks´, Computer Communications, Elsevier 2001.

Dietterich, T & Langley, P 2003, Machine Learning for Cognitive Networks: Technology Assessment and Research Challenges.

Dijkstra, EW 1959, 'A note on two problems in connection with graphs', *Numerische Mathematik*, vol.1, pp. 269–271.

Dolzer, K & Gauger, C 2001, On burst assembly in optical burst switching networks - a performance evaluation of Just-Enough-Time, *Proceedings of the 17th International Teletraffic Congress (ITC 17),* Salvador da Bahia, Brazil, pp. 149-160. September.

Dorigo, M 1992, ´*Optimization, Learning and Natural Algorithms*´, PhD Thesis, Dip. Elettronica e Informazione, Politecnico di Milano, Italy.

Dorigo, M, Maniezzo, V & Colorni, A 1996, The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*.

Dorigo, M & Di Caro, G 1999, Ant Algorithms for Discrete Optimization. *Artificial Life*, Vol. 5, nº2, pp. 137-172.

Dtaal, R & Rouskas, G 2000, A survey of virtual topology design algorithms for wavelength routed optical networks, *Optical Networks Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 73-89, January.

Du, Y, Pu, T, Zhang, H & Guo, Y 2006, Adaptive Load Balancing Routing Algorithm for Optical Burst-Switching Networks, *Conference Paper Optical Fiber Communication Conference Anaheim*, California, March 5.

Durán, R 2008, 'Diseño y Reconfiguración de redes ópticas con encaminamiento por longitud de onda mediante algoritmos genéticos', Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid, España.

Eberhart, R & Shi, Y 2001, Particle Swarm Optimization: Developments, Applications and Resources, IEEE.

Düser, M & Bayvel, P 2002, ´Analysis of a Dynamically Wavelength-Routed Optical Burst Switched Network Architecture´, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, no. 4, pp. 574–585.

Düser, M, de Miguel, I & Bayvel, P 2002, ´Timescale analysis for Wavelength-Routed Optical Burst-Switched (WR-OBS) networks, *in Proc. IEEE/OSA Optical Fiber Communication Conference Exhibit, London*, UK, pp. 222-224.

Düser, M, Kozlovski, E, Killey, R & Bayvel, P 2000, ´Distributed Router Architecture for Packet-Routed Optical Networks´, *New trends in optical network design and modeling*, pp. 187-202.

Dutta, D, Roy, A & Choudhury, K 2013, 'Training Artificial Neural Network using Particle Swarm Optimization Algorithm', *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 3, Issue 3.

Dutta, R & Rouskas, G 2000, A survey of virtual topology design algorithms for wavelength routed optical networks, *Optical Networks*, vol.1, no. 1, pp. 73–89, January.

El-Bawab, T & Shin, J 2002, Optical packet switching in core networks: between vision and reality, *IEEE Journal Communications Magazine*, vol.40, no.9, pp.60-65.

Elbiaze, H 2011, Cognitive mechanisms for providing QoS in OBS networks, *Conference: 13th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON),* vol., no., pp.1-4, 26-30 June.

Eramo, V, Listanti, M & Spaziani, M 2005, ´Resources Sharing in optical packet switches with limited – range Wavelength Converters´, *IEEE/OSA Journal of Light wave Technology*, vol. 23, no. 2, pp. 671-687.

Erramilli, A, Narayan O & Willinger, W 1996, Experimental queuing analysis with long-range dependent packet traffic, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, pp.209-223.

Espina, F, Armendáriz, J, García, N, Morató, D, Izal, M & Magaña, E 2010, *´OBS network model for OMNeT++: A performance evaluation´*, Public University of Navarre, Pamplona, Spain, March.

Facchini, C & Granelli, F 2009, Towards a model for quantitative reasoning in cognitive nodes, *in 3rd IEEE Workshop on Enabling the Future Service-Oriented Internet – Towards Socially-Aware Networks (GLOBECOM '09)*.

Farahmand, F 2005, ´Contention Resolution and Burst Grooming Strategies in Layered Optical Burst-Switched Networks´, Thesis Dissertation.

Farrel, A & Bryskin, I 2006, *GMPLS: Architecture and Applications, Elsevier*.

Farrel, A & Vasseur, J 2006, A Path Computation Element (PCE)-Based Architecture, RFC 4655, August.

Fernández, T, Megala, T & Sreenath, N 2013, 'Challenges, Issues and Research directions in Optical Burst Switching', *International Journal of Computer Applications Technology and Research*, vol. 2, Iss. 2, pp. 131 – 136. Available on: http://www.ijcat.com/archives/volume2/issue2/ijcatr02021009.pdf

Finn, S, Medard, M & Barry, R 1997, A novel approach to automatic protection switching using tres, ICC97.

Firoiu, V, Le Boudec, J, Towsley, D & Zhang, Z 2002, Theories and Models for Internet Quality of Service, *Proceedings of the IEEE*, May.

Fortuna, C & Mohorcic, M 2009, Trends in the development of communication networks: Cognitive networks, *Computer Networks,* vol.53, Issue9, pp.1354–1376.

Franzl, G, Hayat, F, Holynski, T & Fagertun, A 2011, Burst switched optical networks supporting legacy and future service types, *Journal of Computer Networks and Communications*, 310517.

Gabriagues, J & Jacob, J 1991, ´Exploitation of the wavelength domain for photonic switching in IBCN´, *in Proc. of ECOC*, vol. 2, pp. 59-66. Paris, France.

Gavrilovska, L, Krco, S, Milutinović, V, Stojmenović, I & Trobec, R 2011, Application and multidisciplinary aspects of wireless sensor networks : concepts, integration, and case studies', Eds Springer, NY.

Garg, A 2012, Analysis of Impact of Control Plane on High Speed Switching Paradigm, *Greener Journal of Science Engineering and Technological Research ISSN: 2276-783*, vol. 2, no. 1, pp.001-010, April.

Gazen, C & Ersoy, C 1999, Genetic algorithms for designing multihop lightwave network topologies, *Artificial Intelligence in Engineering*, vol.13, Issue 3, pp.211-221, July.

Ge, A, Callegati, F & Tamil, L 2000 ´On Optical Burst Switching and Self-Similar Traffic´, *IEEE Communications letters*, March, vol. 4, no. 3, pp. 98-100.

Gencata, A & Mukherjee, B 2003, Virtual topology adaptation for WDM mesh networks under dynamic traffic, *Journal IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.11, no.2, pp.236,247, April.

Germoni A, Testa, P, Sabella, R & Listanti, M 2011, ´Ethernet burst transport for next generation optical metro networks´, *presented at the High-Speed Networks 2011 (HSN 2011) Workshop at IEEE INFOCOM*, Shangai, Ch, April 10-15.

Gerstel, O, Jinno, M, Lord, A & Ben Yoo, S 2012, ´Elastic Optical Networking: A New Dawn for the Optical Layer?´, *IEEE Communications Magazine*, vol.50, no.2, pp.12-20, February.

Glickman, M, Balthrop, J & Forrest, S 2005, *A Machine Learning Evaluation of an Artificial Immune System*, vol. 13, no. 2, 179-212.

Glover, F & Laguna, M 1997, Tabú Search, Boston, USA: Kluwer Academic Publisher.

Goel, D, & Sharma, A 2009, Performance Analysis of Mobile ADOC Network using AODV Protocol, *International Journal of Computer Science and Security*, vol. 3, Issue 5, pp. 334-343.

Gond, J & Goel, A 2010, Performance Evaluation of Wavelength Routed Optical Network with Wavelength Conversion, *Journal of telecommunications*, vol.2, iss.1, April.

González de Dios, O, Klinkowski, M, García, C, Careglio, D & Solé-Pareta, J 2007, Performance analysis of routing algorithms for optical burst switching, *Proceedings of 11th IFIP Working Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, Athenas, pp. 211-220, May.

González, F, de Miguel, I, Aguado, J, Fernández, P, Lorenzo, R, Abril, E & López, M 2000, ´An algorithm to design logical topologies in wavelength-routed optical networks´, *Broadband Access, WDM Metro and Network Management*, pp. 171-174, IOS-Press.

González de Dios, O, de Miguel, I, Durán, R, Aguado, J, Merayo, N, Fernández, P 2012, Impact of TCP Synchronization on Capacity Dimensioning of Optical Burst Switched (OBS) Links, in Proceedings of NOC 2012, Vilanova, Junio.

Green, P 1993, *Fiber Optic Networks*, Prentice Hall, New Jersey.

Gringeri, S Basch, B, Shukla, V, Egorov, R & Xia, T 2010, ´Flexible architectures for optical transport nodes and networks, *IEEE Comm. Magazine*, pp. 40-50, July.

Grosz, D 2004, *Sistemas de comunicación por fibra óptica de alta capacidad*, Departamento de física y matemática, Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA), Buenos Aires, Argentina.

Goertzel, B, Arel, I & Pennachin, C 2009, CogBot An Integrative Cognitive Architecture Aimed at Emulating Early Childhood Intelligence in a Humanoid Robot.

Guan, X, Thng, I, Jiang, Y & Li, H 2005, Providing absolute QoS through virtual channel reservation in optical burst switching networks, Journal Computer Communications, vol. 28, Issue 9, June, pp.967-986.

Guillamón, M 2005, ´Diseño de Protocolos sobre Redes Ópticas de Conmutación de Ráfagas´ Tesis de grado, Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, España.

Hai-Chau, L, Hasegawa, H & Sato, K 2011, ´Impact of electrical grooming and regeneration of wavelength paths in creating hierarchical optical path networks´, *OPTICS EXPRESS*, December, vol. 19, no. 26.

Hamonangan, S, Takagi, T & Zhang, Y 2003, ´Efficient Routing and Wavelength Assignment in Wavelength-Routed Optical Networks´, APNOMS.

Hanumanth, Y, Kumar, S, Aditya, C & Ravi, T 2012, MEMS Optical Switches, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT),* vol. 1, Issue 9, November.

Hashiguchi, T, Wang, X, Morikawa, H & Aoyama, T 2003, ´Burst Assembly Mechanism with Delay Reduction for OBS Networks´, *in Proceedings of Conference on the Optical Internet (COIN)*, Melbourne, July, pp. 664-666.

Hayat, M, Khan, F & Van, A, 2011, ´Performance model for an OBS node with a shared wavelength converter pool and an FDL buffer per link´, *Optical Network Design and Modeling (ONDM), 2011 15th International Conference on*, vol., no., pp.1-6, 8-10 February.

Herzog, M, Maier, M & Reisslein, M 2004, Metropolitan Area Packet-Switched WDM Networks: A Survey on Ring Systems*, IEEE Communications Surveys Tutorials,* vol. 6, no. 2, pp. 2–20.

Hołynski, T & Faisal, M 2011, "Analysis of OBS Assembly Queue with Renewal Input", Advances in electronics and telecommunications, vol. 2, no. 3, September.

Hong, X, Guo, G, Wu, J, Yin, Y, Liu, L, Zuo, Y, Xu, K, Lin, J & Tsuritani, T 2009, ´Testbed of OBS/GMPLS interworking´, *en Proceedings of 6th International Conference on Broadband Communications, Networks, and Systems* (BROADNETS), Madrid.

Hooman Yousefizadeh, Ali Zilouchian & Mohammad Ilyas 2003, *A survey on fair bandwidth allocation for multicast over the Internet, handbook of optical communication networks*, cap. 7, 2003 by CRC press LLC.

Hu, G, Dolzer, K & Gauger, C 2003, ´Does burst assembly really reduce the selfsimilarity?´,*in Proceedings of Optical Fiber Communications Conference (OFC)*, March, vol. 1, pp. 124 - 126, Atlanta.

Hudek, G & Muder, D 1995, Signaling analysis for a multi-switch all-optical network, *in Proceedings of IEEE International Conference on Communications ICC95*, pp. 1206-1210.

Huiban, G & Mateus, R 2005, *Optimization aspects of the reconfiguration problem in WDM networks*, Research report 5730, INRIA.

Hunter, D, Chia, C & Andonovic, I 1998, ´Buffering in optical packet switching´, *IEEE/OSA Journal of Light wave Technology*, vol.16, no.12, pp. 2081-2091.

Hyytia, E & Nieminen, L 2004, Linear program formulation for routing problem in OBS networks, *Proceedings of the 9th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, Alexandria, pp. 252 - 257, June.

Izal, M. Aracil, J, Morato, D & Magana, E 2006, Delay-throughput curves for timer-based OBS burstifiers with light load, *Journal of Lightwave Technology*, vol.24, no.1, pp.277,285, January.

Jachetta, J 2013, *User's Guide to Fiber Optic Video Transmission – Optical Windows and Spectrum – Part 3*, Posted on November 19, visitado el 01 de febrero de 2014, http://www.vidovation.com/blog/users-guide-to-fiber-optic-video-transmission-optical-windows-and-spectrum-part-3/

Jansen, S 2012, Multi-Carrier Approaches for Next-Generation Transmission: Why, Where and How?, *Nokia Siemens Networks*, Germany.

Jeong, M, Cankaya, H & Qiao, C 2002, On a new multicasting approach in optical burst switched networks, *Journal IEEE Communications Magazine*, vol. 40, Issue 11, November, pp.96-103.

Jian, W, Wei, Z & Minxue, W 2007 *Optical Burst Switching Network Testbed*, en Optical Network Design and Modeling, Lecture Notes in Computer Science., Springer Berlin, vol. 4534, pp. 166-175.

Jin, M & Yang, O 2006, 'A Traffic Shaping Heuristic for Congestion Control in Optical Burst-Switched Networks', *Proceedings 2006 31st IEEE Conference on Local Computer Networks*, vol., no., pp.529,530, 14-16.

Jinno, M, Kimura, H, Hibino, Y, Uehara, K, Kukutsu, N, Ito, F & Matsuoka, S 2009, ´Towards Ultrahigh-speed High-capacity Networks´, *NTT Technical review,* May, vol. 7 no. 5.

Jordan, K 2011, *Technologies Advancements and Network Applications for Optical Burst Transport Networks,* ECO 2011, viewed may 2014, www.huawei.com.

Jue, J & Vokkarane, V 2005, *Optical Burst Switched Networks (Optical Networks),* Springer Science+Bussines Media, New York USA.

Kaminov, I & Koch, T 1997, *Optical Fiber Telecommunications III A+B*, New York: Academic.

Kaminov, I, Li, T & Wilner, A 2008, *Optical Fiber Telecommunications, Vol. 5, Part A: Components and Subsystems, 5th Edition (Optics and Photonics),* Elsevier, Amsterdam, Bosoton, London, , Tokio.

Kan, Ch, Balt, H, Michel, S & Verchère, D 2002, *Information Model of an Optical Burst Edge Switch Research & Innovation*, Alcatel USA 3400 Plano Parkway Plano, TX 75075, USA.

Kang, D, Yang, W, Lee, J & y Kim, Y 2010, Dynamic Time based Burst Assemble scheme to reduce energy consumption in OBS network with Low-Power Idle, *on Proceedings of the 16th Asia-Pacific Conference on Communications (APOC),* Auckland, pp. 183-187, November.

Katz, D, Kompella, K & Yeung, D 2003, Traffic Engineering (TE) Extensions to OSPF Version 2, RFC 3630, September.

Kavian, Y & Leeson, M 2012, *Resilient Optical Network Design: Advances in Fault-tolerant Methodologies*, Information Science Reference.

Kavian, Y, Rashedi, A, Mahani, A & Ghassemlooy, Z 2011, *Routing and wavelength assignment in optical networks using Artificial Bee Colony algorithm*, Elsevier GmgH.

Kawadia, V & Kumar, P 2005, ´A Cautionary Perspective on Cross Layer Design´, *IEEE Wireless Commun*, vol. 12, no. 1, pp. 3–11.

Kennedy, J & Eberhart, R 1995, Particle swarm optimization*, Proceedings IEEE International Conference on Neural Networks, 1995,* vol.4, no., pp.1942-1948, Nov/Dec.

Kieras, D & Meyer, D 1997, *An overview of the EPIC architecture for cognition and performance with application to human-computer interaction. Human-Computer Interaction*, vol. 12, pp. 391-438.

Kim, B, Lee, J, Cho, Y & Montgomery, D 2004, 'An Efficient Optical Burst Switching Technique for Multi-Hop Networks', *IEICE Transmission Communications,* vol.87-B, no. 6.

Kim, J, Choi, J, Im, J, Kang, M & Rhee, K 2007, *Novel Passive Optical Switching Using Shared Electrical Buffer and Wavelength Converter*, Tomkos *et al. (Eds)* 2007, ONDM 2007, LNCS 4534, pp. 358–367, 2007.c IFIP International Federation for Information Processing.

Kitayama, K, Koga, M, Morikawa, H, Hara, S & Kawai, K 2005, Optical Burst Switching Network Testbed in Japan, *Conference Paper Optical Fiber Communication Conference*, Anaheim, California, March 6.

Kliazovich, D, Granelli, F & da Fonseca, N 2010, *Architectures and Cross-Layer Design for Cognitive Networks*, Handbook on Sensor Networks, pp. 3-24.

Klinkowski, M 2007, *´Offset Time-Emulated Architecture for Optical Burst Switching - Modelling and Performance Evaluation´*, Ph.D. thesis, Universitat politénica de Catalunya, ESP.

Klinkowski, M, Careglio, D & Sole-Pareta, J 2009, Reactive and proactive routing in labelled optical burst switching networks, *IET Communications*, vol. 3, no. 3, pp. 454-464, March.

Klinkowski, M, Herrero, F, Careglio, D & Sole-Pareta, J 2005, Adaptive routing algorithms for optical packet switching networks, *Proceedings of Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, Milan, pp. 235 - 241, February.

Klinkowski, M, Pedro, J, Careglio, D, Pióro, M, Pires, J, Monteiro, P & Solé-Pareta, J 2010, An overview of routing methods in optical burst switching networks, *Optical Switching and Networking*, vol. 7, no. 2, pp. 41-53, April.

Konda, V & Chow, T 2001, Algorithm for traffic grooming in optical networks to minimize the number of transceivers, *IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing 2001*, Dallas (US), pp. 218–221, May.

Kozlovski, E, Düser, M, de Miguel, I & Bayvel, P 2001, ´Analysis of Burst Scheduling for Dynamic Wavelength Assignment in Optical Burst-Switched networks´, *in Proceedings of the 14th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS)*, vol. 1, pp. 161 – 162, San Diego.

Kozlovski, E 2003, Survivability of wavelength-routed optical burst-switched networks with guaranteed IP services, *Transparent Optical Networks, Proceedings of 2003 5th International Conference on*, vol.1, no., pp.148, 153, vol.1, 29 June-3 July.

Kozlovski, E & Bayvel, P 2003, *QoS Performance of WR-OBS Network Architecture with Request Scheduling*, Next Generation Optical Network Design and Modelling, Springer NY.

Kramer, G, Mukherjee, B, Ye, Y, Dixit, S, Hirth R 2002, 'Supportend Differentiated Classes of Service in Ethernet Passive Optical Networks', *OSA Journal of Optical Networking,* vol.1, pp. 280-298.

Kukuchi, F & Ono, T 2001, ´10.92-Tbits/s triple-band / ultra-dense optical repeated transmission Experiment´, *in Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, Anaheim, California, USA, March, no. PD24, LA.

Labourdette, J & Acampora, A 1991, Logically rearrangeable multihop lightwave networks, *IEEE Transactions on Communications*, vol.39, no.8, pp.1223-1230, August.

Langley, P & Simon H 1995, Applications of machine learning and rule induction, *Communications of the ACM*, no. 38, November, pp. 55-64.

Laird, R, John, N & Allen, P 1987, Soar: An Architecture for General Intelligence, *Artificial Intelligence*, vol. 33, pp.1-64.

Lázaro, S 2010, ´Evaluación de prestaciones de algoritmos RWA para redes todo ópticas WDM en tiempo real´, Tesis de grado, Ingeniería de Telecomunicación, Universidad Autónoma de Madrid, Escuela Politécnica Superior, Madrid, España.

Lazzez, A, El Fatmi, S & Boudriga, N 2005, ´Performance analysis and simulation of a novel OBS network architecture´, *Electronics, Circuits and Systems, ICECS, 12th IEEE International Conference on*, vol., no., pp.1-5, 11-14, December.

Leenher, M, Develder, C, Buysse, J, Dhoedt, B & Demeester, P 2009, Performance analysis and dimensioning of multi-granular optical networks, *Optical Switching and Networking*, vol. 6, no. 2, pp. 88-98, April.

Lehman, J, Laird, J & Rosenbloom, P 2006, Gentle Introduction to Soar, architecture for human cognition, update.

Leiva, A, Finochietto, J, Huiszoon, B, López, V, Tarifeño, M, Aracil, J & Beghelli, A 2011, Comparison in Power Consumption of Static and Dynamic WDM Networks, *Optical Switching Networks'*, vol. 8, pp. 149-161.

Leland, W, Taqqu, M, Willinger, M & Wilson, D 1994, On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version), *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.2, no. 1, pp.1-15.

Le, V, Jiang, X, Horiguchi, S & Inoguchi, Y 2005, A new fitness function for GA-based dynamic RWA algorithms in optical WDM networks, *Networks, 2005. Jointly held with the 2005 IEEE 7th Malaysia International Conference on Communication, 2005 13th IEEE International Conference on*, vol.2, no., pp.5, pp. 16-18 November.

Li, B, Chu, X & Sohraby, K 2003, ´Routing and wavelength assignment versus wavelength converters placement in all-optical networks´, *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 8, pp. S22-S28, August.

Li, D & Du, Y 2008, *Artificial Intelligence with uncertainty*, Chapman & Hall/CRC, Taylor and Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Ratón, FL 33487-2742.

Li, X, Cao, J, Qiao, Y & Chen, C 2002 ´Assembling TCP/IP Packets in Optical Burst Switched Networks´, *in Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, November, vol. 3, pp. 2808 – 2812.

Li, Q, Quax, P, Luyten, K & Lamotte, W 2012, A Cognitive Network for Intelligent Environments Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS), *2012 Sixth International Conference on* , vol., no., pp.317,322, 4-6 July.

Lin, H, Chang, W & Lin, T 2008, On burst-header contention-resolution in OBS networks, *Photonic Network Communications*, vol. 16, no. 2, pp. 155-168, October.

Lin, L & Goldstein, E 1999, Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) for WDM Optical-Crossconnect Networks, *AT&T Labs-Research IEEE Magazine*.

Liu, J, Ansari, N & Ott, T 2003, FRR for Latency Reduction and QoS Provisioning in OBS Networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, no.7, September.

Liu, Z, Jaekel, A, Bandyopadhyay, S 2002, A genetic algorithm for optimization of logical topologies in optical networks, *Parallel and Distributed Processing Symposium., Proceedings International*, IPDPS.

Loi, C, Liao, W & Yang, D 2002, ´Service differentiation in optical burst switched networks´, *In Proceedings, IEEE Globecom*, November, vol. 3, pp. 2313–2317.

López, A 2010, ´Diseño y análisis de una red de comunicaciones con conmutación óptica de paquetes´ Tesis PhD, Universidad de Zaragoza, España.

López, G, Toledo, A, Ordóñez, H, Agredo, JP 2011, 'Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM', *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC, Julio-Diciembre de 2011*, vol. 20, no. 31, pp. 23-35.

Machida, K, Imaizumi, H, Morikawa, H & Murai, J 2008, A RWA Performance Comparison for Hybrid Optical Networks combining Circuit and Multi-Wavelength Packet Switching.

Magana, E, Morato, D, Izal, M, Aracil, J 2005, ‘Evaluation of preemption probabilities in OBS networks with burst segmentation’, *IEEE International Conference on Communications ICC 2005*, vol.3, no., pp.1646, 1650, Vol. 3, 16-20.

Mahmoud, Q 2007, *Cognitive Networks Towards Self-Aware Networks,* John Wiley & Sons, Ltd., UK.

Maier, M 2008, *Optical Switching Networks*, Cambridge University Press, New York, USA.

Malkin, G,"RIP Version 2", RFC 2453, noviembre 1998.

Mannie, E 2004, *Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture*, RFC 3945, October.

Mangwala, M & Ekabua, O 2013, A Survey of Burst Assembly Algorithms for Optical Burst Switching (OBS), *International Journal of Engineering and Technology Research*, vol. 1, no. 7, pp.107-115, August. ISSN: 2327-0349 (Online) Available online at www.ijeatr.org.

Marchetto, G 2010, ‘High-Priority First Transmission to Efficiently Support Service Differentiation in Just-in-Time OBS Networks’, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol.2, no.12, pp.1031-1041.

Marsden, A, Maruta, A & Kitayama, K 2008 ´Routing and Wavelength Assignment Encompassing FWM in WDM Lightpath Networks´, *Proc. Of IFIP ONDM 2008*, Spain, March.

Mehlman, J 2010, *Rearchitecting the OSI Stack: Application Layer Considerations for Wireless Video Delivery*, Electrical Engineering Department, Stanford.

Mitchell, T 1997, *´Machine Learning´*, eds McGraw Hill.

Michie D, Spiegelhalter D, & Taylor C, 1994, Machine learning, and Neural Statistical Classification, originally published by Ellis Horwood, available on: http://www1.maths.leeds.ac.uk/~charles/statlog/indexdos.html.

Miletic, V, Mikac, B & Dzanko, M 2012, ´Modelling Optical Network Components: A Network Simulator-Based Approach´, *Telecommunications (BIHTEL), IX International Symposium on* , 25-27 October, vol.1, pp.1-6.

Mitola, J & Maguire, G 1999, Cognitive radio: making software radios more personal, *Personal Communications, IEEE* , vol.6, no.4, pp.13,18, August.

Mitola III, J 2006, *Cognitive Radio Architecture*, John Wiley & Sons, New York.

Mitola, J 2007, *Cognitive Radio Architecture*, Cognitive Networks: Towards Self-Aware Networks, Qusay H. Mahmoud.

Monoyios, D & Vlachos, K 2008, ´Emulating lossless, one-way signaling protocols in OBS networks with traffic prediction´, *Optical Network Design and Modeling, 2008. ONDM2008. International Conference on*, vol., no., pp.1-6, 12-14 March.

Monteiro, P & Pires, J 2009, Traffic Engineering in the Wavelength Domain for Optical Burst-Switched Networks, *Journal of Lightwave Technology*, vol.27, no.15, pp.3075,3091, August.

Morioka, T 2009, New generation optical infrastructure technologies: “EXAT initiative” towards 2020 and beyond, *14th Optoelectronics and Communications Conference, OECC 2009*, February.

Morioka, T, Masahiko J, Takara, H & Kubota, H 2012, Innovative Future Optical Transport Network Technologies, NTT.

Moy, J 1998, ´OSPF Version 2, RFC 2328, April.

Mukherjee, B 1997, *Optical Communication Networks*, McGraw-Hill, New York.

Mukherjee, B, Banerjee, D, Ramamurthy, S & Mukherjee, A 1996, Some principles for designing a wide area optical network, *IEEE/ACM Transactions Networking*, vol.4, pp.684–696.

Murthy, C & Gurusamy, M 2003, *WDM Optical Networks (Concepts, Design and Algorithms)*, Upper Sadle River, NJ, Prentice Hall PTR, chapter 2.

Nakkeeran, R, Balaji, C, Gujju, N, Balakumaran, K, Sasidharan, M 2007, Enhanced Burst Assembly Mechanism with Hybrid Signaling Scheme for Optical Burst Switched Networks, *Proceedings of the 15th International Conference on Advanced Computing and Communication (ADCOM),* Guwahati, pp. 727-732, December.

Nakkeeran, R, Vivek Varun, A & Kota, P 2004, *Genetic algorithm based approach for routing and wavelength assignment*, Department of Electronics and Communications Engineering, Pondicherry, Engineering College Pondicherry, India.

Nawaz, A, Hong, X, Wu, J & Lin, J 2009, Impact of OBS and TCP parameters on Networks, *in Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit (OFC)*, 241 Anaheim, pp. 771–773, March.

Newell, A & Simon, H 1973, Human Problem Solving.

Oh, S & Kang, M 2002, ´A Burst Assembly Algorithm in Optical Burst Switching Optical Burst Switched Networks´, *on Proceedings of Optical Networking and Communications Conference - OptiComm*, Boston, pp. 149-159, July.

Onur, E*,* Durmus, Y, Hawas, M, Heemstra, S, Ignas G & Niemegeers, M 2011, Collaborative and Cognitive Network Platforms: Vision and Research Challenges, Wireless Pers Commun, pp.58:71–93.

Oppenheimer, P 2010, *Top-Down Network Design, 3rd Edition*, Cisco Press, Part of the Networking Technology series.

Oran, D 1990, ´OSI IS-IS Intra-domain Routing Protocol´, RFC 1142, February.

Overby, H 2002, ‘A Study on Service Differentiation in Bufferless Optical Packet/Burst Switched Networks’, Norwegian University of Technology and Science (NTNU), Department of Telematics. Trondheim, Norway.

Overby, H, Stol, N, Nord, M 2006, Evaluation of QoS Differentiation Mechanisms in Asynchronous Bufferless Optical Packet Switched Networks, *IEEE Communications Magazine 44*, vol.8, pp. 52-57, August.

Pachnicke, S, Paschenda, T & Krummrich, P 2008, ´Assessment of a constraint based routing algorithm for translucent 10 Gb/sec DWDM networks considering fiber nonlinearities´, *Journal of Optical Networking*, vol 7, issue 4, p. 365, March.

Papadimitriou, G, Papazoglou, Ch, & Pomportsis, A 2006, *Optical Switching,* Wiley Interscience.

Parthiban, R, Leckie, C, Zalesky, A, Zukerman, M & Tucker, R 2009, Cost Comparison of Optical Circuit-Switched and Burst-Switched Networks, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 13, pp. 2315-2329, July.

Pavón, P & Neri, F 2011, On the Myths of Optical Burst Switching, *IEEE Transactions on Communications*, vol.59, pp.2574-2584.

Paxon, V & Floyd, S 1995, Wide area traffic: the failure of Poisson modeling, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.3, no. 3, pp.226-244.

Pedroso, P, Careglio D, Casellas R, Klinkowski, M, J. Solé-Pareta 2008, 'An interoperable GMPLS/OBS Control Plane: RSVP and OSPF extensions proposal', *Proceedings of Sixth International Symposium IEEE CSNDSP08*, Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, Graz, Austria, pp.418-422.

Peng, S, Li, Z, Zhang, Z, He, Y & Xu, A 2009, Modeling and performance analysis of TCP over grid-OBS networks, *Communications Letters*, IEEE, vol.13, no.7, pp.540-542.

Peng, S, Yang, X, Zhou, J, Long, K & Liu, Z 2010, ´An intelligent services-aware generalized optical burst assembly m enabling multi-services transmission´, *9th International Conference on Optical Internet (COIN), 2010*, vol., no., pp.1-3, 11-14 July.

Pirolli, P & Card, S 1999, *Information Foraging. Psychological Review*, vol. 106, pp. 643-675.

Pozo, J 2006, *Teorías Cognitivas del Aprendizaje*, Ediciones Morata, Madrid, ESP.

Prathombutr, P 2003, ´Virtual Topology Reconfiguration in Wavelength-Routed Optical Networks´, PhD Thesis, University of Missouri - Kansas City, USA.

Popovski, P, Ingram, M, Peel, C, Hara, S & Toumpis, S 2009, Cross-Layer Design for the Physical, MAC, and Link Layer in Wireless Systems, *Journal of Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*.

Puche, W, Montoya, G & Sierra, J 2008, ´ Tecnologías de Transporte Óptico: hacía Optical Burst Swiching (OBS)´, *Investigaciones Aplicadas*, vol. 1, no. 4, pp. 41-52.

Phuritatkul, J, Ji, Y & Yamada, S 2007, Proactive Wavelength Pre-Emption for Supporting Absolute QoS in Optical-Burst-Switched Networks, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, Issue 5, pp.1130-1137.

Praveen, B, Praveen, J & Murthy, C 2006, A survey of differentiated QoS schemes in optical burst switched networks, *Journal Optical Switching and Networking*, vol.3, Issue 2, August, pp.134-142.

Priebe, C & Marchette, D 1993, Adaptive mixture density estimation, *Pattern Recognition*, vol. 26, pp.771–785.

Qiao, C & Mei, Y 1996, ´On the multiplexing degree required to embed permutations in a class of interconnection networks´, *in Proceedings of the IEEE Symposium High Performance Computer Architecture*, pp. 118-129, February.

Qiao, C & Yoo, M 1999, 'Optical burst switching (OBS)—A new paradigm for an optical internet', *Journal of High Speed Networks*, vol. 8, pp. 69–84.

Qiao, C & Yoo, M 2000, ´Choices, Features and Issues in Optical Burst Switching´, *Optical Networks Magazine*, Vol. 1, no. 2, pp. 36-44.

Qiao, C 2000, Labeled Optical Burst Switching for IP over WDM Integration, optical networking solutions for next generation internet networks, *IEEE Communications Magazine*, septiembre.

Raychaudhuri, D, Evans, J, Seshan, S, Mandayam, N, Ewy, B & Steenkiste, P 2006, CogNet - An Architectural Foundation for Experimental Cognitive Radio Networks within the Future Internet, *MobiArch'06*, December 1, San Francisco, CA, USA

Raisinghani, V & Iyer, S 2004, *Cross-Layer Design Optimizations in Wireless Protocol Stacks*, Comp. Communications, vol. 27, pp. 720–24.

Rajaduray, R, Blumenthal, D & Ovadia, S 2003, ´Impact of Burst Assembly Parameters on Edge Router Latency in an Optical Burst Switching Network´, *en Proceedings of 16th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society* (LEOS), vol. 1, Tucson, pp. 55-56.

Rajesh, M, Krishnaswamy, M & Sivarajan, K 2001, ´Design of Logical Topologies: A Linear Formulation for Wavelength-Routed Optical Networks with No Wavelength Changers´, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 9, no. 2, April.

Ramamirtham, J & Turner, J 2003, 'Time sliced optical burst switching', *Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications*, IEEE INFOCOM03, vol.3, no., pp.2030,2038 vol.3.

Ramamurthy, B & Mukherjee, B, 1998, ´Wavelength Conversion in WDM Networking´, *IEEE JSAC*, vol. 16, no. 7, pp. 1061–73, September.

Ramantas, K & Vlachos, K 2009, ´A combined TCP aware scheduling and assembly scheme for OBS networks´, *Sixth International Conference on Broadband Communications, Networks, and Systems, 2009, BROADNETS2009*, vol., no., pp.1-6, 14-16, September.

Ramantas, K, Vlachos, K, González De Dios, O & Raffaelli, C 2008, ´Window-based burst assembly scheme for TCP traffic over OBS´, *Journal of Optical Networking*, vol. 7, no. 5, pp. 487-495.

Ramaswami, R, & Sivarajan, K 1996, ´Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks´,*Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol.14, no.5, pp. 840,851, June.

Ramaswami, R, Sivarajan, K & Sasaki, G 2010, *Optical Networks: A practical perspective*. Edit Morgan Kauffman, Elsevier, Burlingtong USA.

Ramming, C 2004, ´Cognitive networks´, *in Proc. DARPATech Symposium*, CA, USA.

Rao, H, Kumar, S, Aditya, C & Ravi, T 2012, ´Mems Optical Switches´*, International Journal of Engineering Research & Technology IJERT*, ISSN: 2278-0181, vol. 1 Issue 9.

Restak, R 2005, Our New Brain, *Family & Relationships / Interpersonal Relations Published* May 1.

Reza, A & Hyotaek, L 2011, ´Throughput and delay performance analysis of feed-forward and feedback shared fiber delay line based hybrid buffering optical packet switch´, *International Conference on Information Networking (ICOIN), 2011*, vol., no., pp.414-418, 26-28 January.

Rodrigues, J & Vaidya, B 2009, ´Evaluation of Resource Reservation Protocols for IP over OBS Networks, *ICTON International Conference on Transparent Optical Networks*, Portugal, June 28 -July 2.

Rodriguez, A & Saavedra, F 2010, Optimization of Genetic Algorithms for the Integral Solution of Routing Wavelength Assignement, *Información Tecnológica,* vol. 21, no. 3, pp. 125-133.

Roeck, F, Ramantas, K, Leitgeb, E, Vlachos, K 2011, 'A hybrid signaling protocol for enhancing performance of OBS networks', *International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM),* pp.1-6, 8-10, February.

Rousu, J 2013, Kernel Machines, Pattern Analysis and Computational Biology, Helsinki Institute for Information Technology HIIT Annual Report, Ella Bingham (ed.).

Saad, M & Luo, 2005, Reconfiguration with No Service Disruption in Multifiber WDM Networks, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, no. 10, pp. 3092–3104, October.

Sabir, F, Ul-Haq, Z & Zaidi, S 2010, ´An independent wavelength assignment, QoS differentiation scheme, in DWDM OBS networks, for zero high priority burst loss´, *High-Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET), 2010* , vol., no., pp.274,279, 19-2, December.

Saha, I & Mukhopadhyay, A 2008, Genetic Algorithm and Simulated Annealing based Approaches to Categorical Data Clustering, *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2008*, vol.1, pp.19-21, March, Hong Kong.

Sano, A, Takara, H, Kobayashi, T, Kawakami, H, Kishikawa, H, Nakagawa, T, Miyamoto, Y, Abe, Y, Ono, H, Shikama, K, Nagatan,i M, Mori T, Sasaki, Y, Ishida, I, Takenaga, K, Matsuo, S, Saitoh, K, Koshiba, M, Yamada, M, Masuda, H & Morioka, T 2013, '409-Tb/s + 409-Tb/s crosstalk suppressed bidirectional MCF transmission over 450 km using propagation-direction interleaving', *Optics Express*, vol. 21, Issue 14, pp. 16777-16783.

Sahara, A, Kasahara, R, Yamazaki, E, Aisawa, S & Koga, M 2005, The Demonstration of Congestion-Controlled Optical Burst Switching Network Utilizing Two-Way Signaling-Field Trial in JGN II Testbed, *Conference Paper Optical Fiber Communication Conference*, Anaheim, California, March 6.

Sarrazin, D, Jordan, H & Heuring, V 1990, ´Fiber Optic Delay Line Memory´, *Applied Optics*, vol. 29, no. 5, pp. 627-637.

Sasaki, G & Gerstel, O 2000, ´Minimal cost WDM SONET rings that guarantee no blocking´, *Optical Networks Magazine*, October, vol. 1, no. 4.

Shacham, A, Small, BA, Ladouceur, O & Bergman, K 2005, A Fully Implemented 12 × 12 Data Vortex Optical Packet Switching Interconnection Network, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, no. 10.

Shakkottai, S, Rappaport, T & Karlsson, P 2003, Cross Layer Design for wireless networks, IEEE Communication Magazine, vol.41, no. 10, pp.74-80.

Shrikhande, K, White, I, Wonglumsom, D, Gemelos, S, Matthew S, Rogge, Y, Fukashiro, M, Avenarius and Kazovsky, L 2000, ´HORNET: A Packet-Over-WDM Multiple Access Metropolitan Area Ring Network´, *IEEE J. Sel. Areas Communications*., vol. 18, no. 10, pp. 2004–2016.

Sideri, A & VarvarigosI, E 2007, New Assembly Techniques for Optical Burst Switched Networks Based on Traffic Prediction.

Sifalakis, M & Hutchison, D 2005, From Active networks to cognitive networks, *Dagstuhl Seminar Proceedings 04411, Service Management and Self-Organization in IP-based Networks*. Lancaster, UK.

Sifalakis, M 2004, Adding reasoning and cognition to the Internet, *on Proceedings 3rd Hellenic Conference on Artificial Intelligence*, Greece.

Silva, E, Carvalho, L, Silva, R, Perin, J, Silva, M, Cardoso, P & Oliveira, J 2013, Experimental optical generation of DP-16QAM modulation format for high spectral efficiency optical transmission, *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, On-line version ISSN 2179-1074.

Singh, H, Prakash, J, Arora, D & Wason, A 2011, Analysis of Blocking Probability in OBS Networks, *International Journal of Scientific & Enginnering Research,* Volume 2, Issue 11.

Spohn, D 1997, *Data Network Design, Chapter 18th*, McGraw Hill.

Srivastava V, 2005, ´Cross-Layer Design: A Survey and the Road Ahead´, *IEEE Communications Magazine*, December.

Stern, TE & Bala, K 1999, *Multiwavelength Optical Networks: A Layered Approach,* Addison-Wesley.

Subramaniam *et al*. 2013, Cross Layer Design in Optical Networks, Springer.

Sullivan, J, Charbonneau, N & Vokkarane, V 2010, Performance Evaluation of TCP over Optical Burst Switched (OBS) Networks Using Coordinated Burst Cloning and Forward-Segment Redundancy, *GLOBECOM 2010*, pp.1-6.

Sun, R & Zhang, X 2006, ´Accounting for a variety of reasoning data within a cognitive architecture´, *J Exp Theor Artif Intell,* pp. 169–191.

Sun, R 2002, Duality of the Mind, *Lawrence Erlbaum Associates*, Nahwah, NJ.

Sun, R 2003, Tutorial of CLARION 5.0.

Sutton, R & Barto, A 1998, *Reinforcement Learning: An Introduction*, MIT Press, USA.

Tachibana, T & Kasahara, S 2007, Two-Way Release Message Transmission and Its Wavelength Selection Rules for Preemption in OBS Networks, *IEICE Transactions on Communications*, vol. E90-B, no. 5, pp. 1079-1089, May.

Talbi, E 2009, Metaheuristics: From Design to Implementation, A JohnWiley & Sons, Inc., Publication, Hoboken, NJ.

Tanemura, T, Amin, A & Nakano, Y 2009, Development and field demonstration of an optical burst switching testbed with PLZT optical matrix switch, *International Conference on Photonics in Switching*, PS'09.

Teng, J & Rouskas, G 2005, Routing path optimization in optical burst switched networks, P*roceedings of the 9th Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, Milan, February.

Teng, J, Rouskas, G 2003, A Comparison of the JIT, JET, and Horizon Wavelength Reservation Schemes on A Single OBS Node, Department of Computer Science, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695-7534.

Thodime, G, Vokkarane, V & Jue, J 2003, Dynamic congestion-based load balanced routing in optical burst-switched networks, *Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, San Francisco, pp. 2628 - 2632, December.

Thomas, R, DaSilva, L & MacKenzie, A 2005, Cognitive networks, New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, *DySPAN 2005, First IEEE International Symposium on,* vol., no., pp.352,360, 8-11, November.

Thomas, R, DaSilva, L & MacKenzie, A 2006, Cognitive Networks: adaptation and learning to achieve end to end performance objectives, Proceedings of the Communications Magazine, vol.44, Issue 12, pp.51-57.

Thomas, R, Komali, R, Mackenzie, A & DaSilva, L 2007, Joint power and channel minimization in topology control: Acognitive networks approach, IEEE ICC`07, pp.6538-6543, Glasgow, Scotalnd.

Tomkos, I, Angelou, M, Durán, R, de Miguel, I, Lorenzo, R, Siracusa, D, Tymecki, A, Ye, Y & Tafur I 2012, ´*Next Generation Flexible and Cognitive Heterogeneous Optical Networks - Supporting the Evolution to the Future Internet*´, Future Internet Assembly, Springer, pp. 225-236.

Tronco, R, Feres, M, César, A & Rocha, M 2013, Self-Configuration and Self-Healing for Cognitive Optical Networks, *Journal of Microwaves, Optoelectronics & Electromagnetic Applications*, vol.12.

Trong, V, Jiang, X Ngo, S & Horiguchi, S 2005, ´Dynamic RWA Based on the Combination of Mobile Agents Technique and Genetic Algorithms in WDM Networks with Sparse Wavelength Conversion´, IEICE Trans. INF. & SYST., vol.88, no.9 September.

Turner, J 1999, ´Terabit burst switching´, *Journal of High Speed Networks*, vol.8, pp. 3-16.

Ujager, F, Zia-ul-Haq, Ramzan, M & Zaidi, S 2010, An independent wavelength assignment, QoS differentiation scheme, in DWDM OBS networks, for zero high priority burst loss, *High-Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET), 2010* , vol., no., pp.274,279, 19-21 December.

Varvarigos, E & Sharma, V 1997, ´The Ready-To-Go Virtual Circuit Protocol: A loss-Free Protocol for Multigigabit Networks Using FIFO Buffers´, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, October, vol. 5, no. 5, pp. 705–718.

Venkatesh, T & Murthy, C 2010, ´Introduction to optical burst switching, in An Analyti- cal Approach to Optical Burst Switched Networks´, Springer, pp. 1–41.

Verma, S, Chaskar, H & Ravikanth, R 2000, Optical Burst Switching: A Viable Solution for Terabit IP Backbone, *IEEE Network*, November/December.

Vicat-Blanc, P, Goglin, B, Guillier, R, Soudan, S 2011, *Computing Networks: from cluster to cloud computing*, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Great Britain.

Vieira, EQ 1984, 'An algorithm for Ranking Paths That May Contain Cycles', *European Journal of Operational Research*, vol. 18, pp. 123-130.

Vlachos, K & Monoyios, D 2009, A Virtual One-Way Signaling Protocol with Aggressive Resource Reservation for Improving Burst Transmission Delay, *Journal of Lightwave Technology,* vol.27, no.14, pp.2869-2875, July15.

Vokkarane, V & Jue, J 2003, ´Burst segmentation: an approach for reducing packet loss in optical burst switching networks´, *SPIE/Kluwer Optical Networks*, vol. 4, no. 6, pp. 81-89.

Vokkarane, V & Jue, J, 2002, Prioritized Routing and Burst Segmentation for QoS in Optical Burst-Switched Networks, *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, Anaheim, p. 221, March.

Vokkarane, V, Haridoss, K & Jue, J 2002 ´Threshold-Based Burst Assembly Policies for QoS Support in Optical Burst-Switched Networks´, *in Proceedings od SPIE Optical*

Networking and Communication Conference (OptiComm), vol. 4874, pp. 125-136, Boston.

Vokkarane, V, Zhang, Q, Jue, J & Chen, B 2002, Generalized burst assembly and scheduling techniques for QoS support in optical burst-switched networks, *Proceedings of International Symposium on High capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET),* Cairo, pp. 274 - 279, December.

Waheed, S 2011, 'Comparing Optical Packet Switching and Optical Burst Switching', *Daffodil International University Journal of Science and Technology*, vol. 6, Iss. 2.

Wang, Q & Abu-Rgheff, M 2003, ´Cross-Layer Signalling for Next-Generation Wireless Systems´, *Proc.IEEE Wireless Commun. and Net. Conf.*, New Orleans.

Wauters, N & Demeester, P 1996, 'Design of the Optical Path Layer in Multiwavelength Cross-Connected Networks', *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, Vol. 14, No. 5, pp. 881–892.

Wei, J & McFarland, R 2000, ´Just-In-Time Signaling for WDM Optical Burst Switching Networks´, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, no. 12, pp. 2019–2037, December.

Wu, J, Yin, Y, Cai, S, Hong, X & Lin, J 2008, ´Experimental Performance Evaluation of High Speed TCPs in Traffic-Driven LOBS Network Testbed´, *en Proceedings of the Conference on Optical Fiber communication (OFC)*, San Diego, paper OThB6.

Wuttisittikulkij, L & O'Mahony, M 1997, ´Design of a WDM network using a multiple ring approach´, *in Proc. IEEE Global Telecommunications Conference*, Phoenix, AZ, vol. 1, pp. 551-555.

Xin, Ch, Wang, B, Cao, X & Li, J 2006, ´Logical Topology Design for Dynamic Traffic Grooming in WDM Optical Networks´, *Journal of lightwave technology*, June, vol. 24, no. 6.

Xiong, Y, Vandenhoute, M & Cancaya, H 2004, *Control architecture in optical burst-switched networks*, US Patent 6721315 B1.

Xiong, Y, Vanderhoute, M & Cankaya, H 2000, ´Control architecture in optical burst-switched WDM networks´, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 18(10):1838–1854, October.

Xu, J, Qiao, C, Li, J & Xu, G 2004, Efficient burst scheduling algorithms in optical burst-switched networks using geometric techniques, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.22, no.9, pp.1796,1811, November.

Xu, L, Perros, H & Rouskas, G 2001, Techniques for Optical Packet Switching and Optical Burst Switching*, IEEE Communications Magazine*, January.

Xu, L, Perros, H & Rouskas, G 2003, A simulation study of optical burst switching and access protocols for WDM ring networks, *Computer Networks*, vol. 41, pp.143-160, February.

Xue, F, Pan, Z, Bansal, Y, Cao,J, Jeon, M, Okamoto,K, Kamei ,H, Akella V & Yoo S 2004, End-to-End Contention Resolution Schemes for an Optical Packet Switching Network With Enhanced Edge Routers, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, no. 11.

Yang, M, Zheng, S & Verchere, D 2001, A QoS supporting scheduling algorithm for optical burst switching DWDM networks, *Global Telecommunications Conference, 2001, GLOBECOM '01, IEEE*, vol.1, no., pp.86-91, vol.1.

Yang, L, Jiang, Y & Jiang, S 2003, ´A probabilistic preemptive scheme for providing service differentiation in OBS networks´ *In Proceedings, IEEE Globecom*, pp. 2689–2673.

Yen, J 1971, ‘Finding the k shortest loop-less paths in a network’, *Management Science*, vol.17, pp.712-716.

Yonggyu, L, SeungJin, L & Minho, K 2008, ´Service differentiation using shared FDL bank in OBS networks´, 7th International Conference on Optical Internet, COIN 2008, vol., no., pp.1-2, 14-16 October.

Yoo, M & Qiao, C 1997, Just-enough-time (JET): a high speed protocol for bursty tra_c in optical networks, *In IEEE/LEOS Technologies for a Global Information Infrastructure*, August.

Yoo, M & Qiao, C 1998, A new optical burst switching protocol for supporting quality of service, *in Proc. SPIE'98 Conference All Optical Commun. Syst.: Architecture, Control, Network Issues*, vol. 3531, (Boston), pp. 396-405, November.

Yoo, M, Qiao, C & Dixit, S 2000 ´QoS Performance of Optical Burst Switching in IP Over-WDM Networks´, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications,* vol. 18, no.10.

Yoo, S 2006, ´Optical Packet and Burst Switching Technologies for the Future Photonic Internet´, Journal of Lightwave Technology, vol.24, no.12, pp.4468-4492, December.

Younis, O & Fahmy, S 2003, Constraint-based routing in the internet: Basic principles and recent research, IEEE Journal of Communications Surveys & Tutorials, vol.5, Issue 1, pp.2-13.

Yousefizadeh, H, Zilouchian, A & Ilyas, M 2003, A survey on fair bandwith allocation for multicast over the Internet, in Dorf, R (SE), The Handbook of Optical Communication Networks, CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington D.C.

Yu, X, Chen, Y & Qiao, C 2002, ´Study of Traffic Statistics of Assembled Burst Traffic in Optical Burst Switched Networks´, *in Proceedings of Optical Networking and Communications Conference - OptiComm*, Boston, July, pp. 149-159.

Yu, X, Qiao, C & Liu, Y 2004, ´TCP implementations and false time out detection in OBS networks´, *In Proceedings, IEEE Infocom*, March.

Yuan, P, Gambiroza, V & Knightly, E 2004, ´The IEEE 802.17 media access protocol for high-speed metropolitan-area resilient packet rings´, *IEEE Netw.,* vol. 18, no. 3, pp. 8–15.

Yunhan, L & Sheng, W 2005, ´An FDL-based QoS scheduling algorithm in OBS networks´, *Proc. 2005 International Conference on Communications, Circuits and Systems*, vol.1, no., pp. 639- 642 Vol. 1, 27-30 May.

Zalesky, A 2009, To burst or circuit switch? *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 17, no. 1, pp. 305-318.

Zalesky, A, Wong, E, Zukerman, M, Vu, H & Tucker, R 2004, ´Performance Analysis of an OBS Edge Router´, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, no. 2, pp. 695–697, February.

Zang, H, Jue, J & Mukherjee, B 2000, 'A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks', *optical network Magazine*, vol.1, pp. 47-60, January.

Zapata, A & Bayvel, P 2003, ´Impact of burst aggregation schemes on delay in optical burst switched networks´, *in Proceedings of the 16th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS)*, October, vol. 1, pp. 57-58, Tucson.

Zapata, A, Düser, M, Spencer, J, Bayvel, P, de Miguel, I, Breuer, D, Hanik, N & Gladisch, A 2004, ´ Next-Generation 100-Gigabit Metro Ethernet (100 GbME) Using Multiwavelength Optical Rings´ Journal of Lightwave Tecnology, vol. 22, no. 11, November.

Zapata, A, Düser, M, Spencer, J, Bayvel, P, de Miguel, I, Breuer, D, Hanik, N & Gladisch, A 2004, Multiwavelength Optical Rings, *Journal of Lightwave Technology*, November, vol. 22, no. 11, pp. 2420 – 2434.

Zervas, G & Simeonidou, D 2010, ´*Cognitive Optical Networks: Need, Requirements and Architecture*´, High-Performance Networks Group, School of CSEE, University of Essex, Colchester, United Kingdom.

Zervas, G, De Leenheer, M, Sadehioon, L, Klonidis, D, Qin, Y, Nejabati, R, Simeonidou, D, Develver, Ch, Dhoedt, B & Demeester, P 2009, ´Multi-Granular Optical Cross-

Connect: Design, Analysis, and Demonstration´, *Journal Optical communication Network*, vol. 1, no. 1, pp. 69-84.

Zhang, Ch, Qiu, K, Wang, Y, He, Y & Zhou, H 2009, ´On experiment and analysis of MOOCS-based optical labels for optical packets switching´, 2nd IEEE International Conference on Broadband Network & Multimedia Technology IC-BNMT '09, vol., no., pp.383-387, 18-20 October.

Zhang, F, Lee, Y, Bernstein, J, Han, G & Xu, Y 2010, OSPF Extensions in Support of Routing and Wavelength Assignment (RWA) in Wavelength Switched Optical Networks (WSONs), *draft-zhang-ccamp-rwa-wson-routing-ospf-03* , March.

Zhang, W, Wu, J, Lin, J, Minxue, W & Jindan, S 2007, ´TCP Performance Experiment on LOBS Network Testbed´, *en Proceedings of the 11th international IFIP TC6 conference on Optical network design and modeling (ONDM)*, Atenas, pp. 186-193.

Zhang, W, Wu, J, Xu, K & Lin, J 2006, ´TCP performance experiment on OBS network testbed´, *en Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, Anaheim, paper OThF1.

Zhang, Q, Vokkarane, V, Chen, B & Jue, J 2003, ´Absolute QoS differentiation in optical burst-switched networks´ *In Proceedings, IEEE Globecom*, vol. 5, pp. 2628–2632.

Zheng, J & Mouftah, H 2003, *Distributed lightpath control for wavelength-routed WDM networks, handbook of optical communication networks*, cap. 15, by CRC press LLC.

Zheng, J, Zhou, B & Mouftah, H 2004, Virtual Topology Design and Reconfiguration of Virtual Private Networks (VPNs) over All-Optical WDM Networks, Volume 7, Issue 3, pp 255-266, May.