



Escola Politècnica Superior
de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROYECTO DE FIN DE CARRERA

TITULO DEL TFC: EVALUACIÓN DE ALGORITMOS DE DISTRIBUCIÓN DINÁMICA DE ANCHO DE BANDA EN REDES OPTICAS PASIVAS.

TITULACION: Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones (segundo ciclo)

AUTOR: Anny Martínez

DIRECTORA: Marilet De Andrade Jardín

SUPERVISORA: Mónica Huerta, Universidad Simón Bolívar.

DATA: 25 de Septiembre de 2008

Título: EVALUACIÓN DE ALGORITMOS DE DISTRIBUCIÓN DINÁMICA DE ANCHO DE BANDA EN REDES ÓPTICAS PASIVAS

Autor: Anny Gabriela Martínez Manzanilla

Director: Marilet De Andrade Jardín

Supervisora: Mónica Huerta, Universidad Simón Bolívar.

Fecha: 25 de Septiembre de 2008

Resumen

En el presente proyecto de investigación se estudian las prestaciones de una red de nueva generación EPON –*del inglés: Ethernet Passive Optical Network*- bajo distintos esquemas de asignación de ancho de banda. Además, se estudia el efecto de la variación de parámetros característicos de redes EPON y su influencia sobre el comportamiento del sistema de comunicaciones. La motivación de este proyecto radica en la importancia de desarrollar trabajos de investigación que evalúen el desempeño de las nuevas tecnologías de redes de acceso, con el fin de brindar y proponer nuevas y mejores soluciones tecnológicas para un mercado cuya demanda crece de forma acelerada ante el desarrollo de nuevas Tecnologías de Información y Comunicaciones –TIC. La evolución de las tecnologías de redes de acceso debe soportar el despliegue de nuevas redes y servicios.

En función de los objetivos propuestos, se desarrolló un modelo completo de la red mediante el entorno de simulación *OPNET Modeler*. El proyecto de investigación tecnológica se llevó a cabo en varias fases de desarrollo, la primera de ellas bajo el carácter de proyecto coordinado consistió en el modelado de cada uno de los componentes de una red de acceso de nueva generación EPON con tecnología de acceso TDM –*del inglés: Time Division Multiplexing*- y la evaluación del entorno de simulación bajo el esquema de asignación de ancho de banda de ventana fija. En la segunda fase del proyecto se implementó de forma independiente sobre las bases del modelo de red inicialmente desarrollado, el algoritmo de asignación de ancho de banda DDSPON (De Andrade, Gutiérrez, & Sallent, 2007) –*del inglés: Distributed Dynamic Scheduling for Passive Optical Networks*-, desarrollado por un grupo de investigación de la Universidad Politécnica de Catalunya. Una tercera fase del proyecto, centró sus objetivos en el desarrollo de un modelo de red de comunicaciones EPON con tecnología de acceso WDM –*del inglés: Wavelength Division Multiplexing*- y esquema de asignación de ancho de banda de ventana fija, con el fin de comparar las prestaciones en términos de retardo, capacidad de la red, utilización del canal, throughput, entre otros, de este esquema de acceso versus el de TDM.

En este proyecto se persigue como objetivo obtener, analizar,

interpretar y concluir en torno a un modelo de red de acceso EPON con distintas tecnologías de acceso y esquemas de asignación de ancho de banda con el fin de determinar las prestaciones, ventajas y desventajas de cada uno de estos escenarios.

Palabras Claves: *EPON, TDM, WDM, Algoritmo de asignación de ancho de banda, DBA Fijo, DDSPON, MPCP, red de acceso.*

Title: EVALUATION OF DYNAMIC BANDWIDTH ALLOCATION ALGORITHMS IN PASSIVE OPTICAL NETWORKS.

Author: Anny Gabriela Martínez Manzanilla

Director: Marilet De Andrade Jardín

Supervisor: Mónica Huerta, Universidad Simón Bolívar.

Date: 25 de Septiembre de 2008

Overview

The following research project explores the benefits of the new-generation Ethernet Passive Optical Network, under various schemes for bandwidth allocation. Moreover, it focuses on the effect of adjusting typical parameters of EPON networks and their influence on the behavior of the communications system.

The motivation of this project lies in the importance of developing research work that evaluates the performance of new technologies for access networks, in order to provide and propose new and better technology solutions for a market where demand is growing so fast, due to the development of new Information and Communication Technologies, ICTs. The evolution of access networks technologies must support the deployment of new networks and services.

Fulfilling the objectives of the research project, it was developed a complete model of the EPON network, through the simulation environment OPNET Modeler. The technological research project was carried out in several phases of development, the first phase, under the coordinated nature of the project, consisted of modeling each of the components of a new-generation EPON network with Time-Division Multiplexing technology and evaluating the simulation environment, under the fixed window bandwidth allocation scheme. In the second phase of the project, on the basis of the network model originally developed was implemented the dynamic DBA DDSPON, which stands for **Distributed Dynamic Scheduling for Passive Optical Networks** (De Andrade Gutierrez & Sallent, 2007), developed by a research group at the Polytechnic University of Catalunya. A third phase of the project, focused on developing a model of EPON communication network with Wavelength Division Multiplexing access technology and fixed window bandwidth allocation scheme, in order to compare benefits in terms of delay, network capacity, utilization of the channel, throughput, among others, of this access technology versus that of TDM.

This project pursues to obtain, analyze, interpret and conclude around a model of EPON access network with different access technologies and bandwidth allocation schemes in order to determine the benefits, advantages and disadvantages of each one of these scenarios.

Index Terms: EPON, TDM, WDM, Dynamic Bandwidth Allocation, Fixed DBA, DDSPON, MPCP, access network.

INDICE

INDICE DE TABLAS.....	1
INDICE DE FIGURAS.....	2
LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS.....	6
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. <i>Introducción.....</i>	9
1.2. <i>Antecedentes.....</i>	9
1.3. <i>Organización Del Trabajo.....</i>	10
CAPITULO II: OBJETIVOS.....	11
2.1. <i>Objetivo General.....</i>	11
2.2. <i>Objetivos Específicos.....</i>	11
CAPITULO III: TECNOLOGIA DE REDES DE ACCESO PON.....	12
3.1. <i>Primera Milla: Tecnologías de Redes de Acceso PON – Passive Optical Networks.....</i>	12
3.2. <i>EPON: Ethernet Passive Optical Network.....</i>	16
3.2.1 <i>TDM-EPON: Red de Acceso EPON con tecnología de acceso por multiplexación de tiempo. 18</i>	
3.3. <i>MPCP: Multi-Point Control Protocol.....</i>	20
3.4. <i>Algoritmos de Distribución Dinámica de Ancho de Banda (DBA).....</i>	22
3.4.1. <i>Algoritmo de asignación de ancho de banda DDSPON: Dynamic Distributed Scheduler for EPON.....</i>	23
3.5. <i>TECNOLOGIA DE REDES DE ACCESO WDM-EPON: Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network.....</i>	25
CAPITULO IV: DISEÑO E IMPLEMENTACION DE RED DE ACCESO EPON CON TECNOLOGÍA DE ACCESO TDM.....	27
4.1. <i>Simulador de Sistemas de Comunicaciones OPNET Modeler.....</i>	27
4.2. <i>Fases para la implementación de un Sistema de Comunicaciones de Red EPON mediante el simulador OPNET Modeler.....</i>	29
4.3. <i>Descripción del modelo de red EPON.....</i>	34

4.3.1 Unidad de Red Óptica – ONU	37
CAPITULO V: DISEÑO E IMPLEMENTACION DE ALGORITMO DE ANCHO DE BANDA DDSPON: DISTRIBUTED DYNAMIC SCHEDULER FOR EPON, DESARROLLADO POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA..	51
5.1. Diseño Algoritmo de Asignación de ancho de banda DDSPON desarrollado por la Universidad Politécnica de Catalunya.	51
5.2. Consideraciones de Diseño e Implementación del algoritmo de asignación de ancho de banda DDSPON.....	54
CAPITULO VI: DISEÑO E IMPLEMENTACION DE RED DE ACCESO EPON CON TECNOLOGÍA DE ACCESO WDM	55
6.1. Diseño Red EPON con tecnología de acceso WDM.	55
6.2. Consideraciones de Diseño e Implementación de la red de nueva generación EPON con tecnología de acceso WDM EPON.	55
CAPITULO VII: PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS	57
7.1. Resultados de Simulaciones sobre el Sistema de Red de nueva generación EPON.	57
7.1.1. Estudio de operación del algoritmo de asignación de ancho de banda DDSPON.	64
7.1.2. Estudio de prestaciones de red EPON con tecnología de acceso TDM y algoritmo de asignación de ancho de banda de ventana fija versus algoritmo de asignación dinámica de ancho de banda DDSPON.....	67
7.1.3. Estudio de comportamiento de red EPON con tecnología de acceso TDM versus WDM.	77
CAPITULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
8.1. Conclusiones	81
8.2. Líneas Futuras	82
8.3. Implicaciones Ambientales	82
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	83
BIBLIOGRAFIA	84
ANEXO A	85

**IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMO DE ASIGNACION DE ANCHO DE BANDA DDSPON
EN LA HERRAMIENTA DE SIMULACION OPNET MODELER..... 85**

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Escenarios de Simulación de la Unidad Óptica de Red – ONU	33
Tabla 2: Escenarios de Simulación del Terminal de Línea Óptica – OLT	33
Tabla 3: Escenarios de Simulación del Modelo de Red EPON	34
Tabla 4: Relación Opcode-Proceso en Control Parser de la ONU	40
Tabla 5: Relación Opcode-Proceso en Control Multiplexer de la ONU	40
Tabla 6: Parámetros Ajustables del Modelo de Red EPON desarrollado en OPNET Modeler.	50
Tabla 7: Módulos modificados para ajuste de Algoritmo DBA DDSPON	52
Tabla 8: Registro de ONUs - Escenario de Simulación Red TDM-EPON con DBA de ventana fija	60
Tabla 9: Valores de Carga de la Red para escenarios de simulación	67

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Configuración Punto a Punto Red EPON.....	13
Figura 2: Configuración Activa Red EPON.....	13
Figura 3: Configuración Pasiva de Red de Fibra Óptica	13
Figura 4: Estructura de una Trama Ethernet	16
Figura 5: Punto a Punto –UL-.....	18
Figura 6: Medio Compartido – DL-	18
Figura 7: Red de Acceso EPON con tecnología WDM – Canal de Bajada	25
Figura 8: Red de Acceso EPON con tecnología WDM – Canal de Subida	25
Figura 9: Niveles de Jerarquía de Diseño del Simulador OPNET Modeler.	27
Figura 10: Principales Editores del Simulador OPNET Modeler.....	29
Figura 11: Fases para la Implementación de una red mediante el simulador OPNET Modeler.	30
Figura 12: Subfases del modelado de una Red EPON, mediante el simulador OPNET Modeler.	30
Figura 13: Diagrama de Flujo de Fase de Simulación.....	32
Figura 14: Esquema de Actividades de la Fase de Simulación para la validación de nodos.....	32
Figura 15: Esquema de Actividades de la Fase de Simulación para la validación del modelo de red.....	33
Figura 16: Modelo de Red EPON implementado en OPNET Modeler	35
Figura 17: Módulos de la Unidad Óptica de Red - ONU.....	36
Figura 18: Módulos del Terminal de Línea Óptica – OLT.....	37
Figura 19: Implementación de ONU a nivel de nodos en OPNET Modeler.....	38

Figura 20: Principio de Operación del Control Parser de la ONU.....	39
Figura 21: Principio de Operación del Control Multiplexer de la ONU.....	41
Figura 22: Principio de Operación del Control Multiplexer	41
Figura 23: Modelo de Nodos del Dispositivo Óptico implementado en OPNET Modeler	48
Figura 24: Diagrama de Flujo de Operación de Algoritmo DDSPON en el OLT....	52
Figura 25: Diagrama de Flujo de Operación de Algoritmo DDSPON en la ONU... 53	
Figura 26: Esquema en tiempo del algoritmo de asignación de ancho de banda DDSPON para un caso de tres ONUs.....	54
Figura 27: Línea de Tiempo de Escenario de Simulación de Red EPON con Tecnología TDM y algoritmo DBA de ventana fija.....	59
Figura 28: Proceso Discovery Agent del OLT para Escenario de Simulación TDM-EPON con DBA de ventana fija.....	61
Figura 29: Proceso Report Reception superpuesta con Proceso Discovery Agent.	62
Figura 30: Control Multiplexer, Proceso Transmisor de las ONUs	63
Figura 31: Requerimiento de las ONUs.....	64
Figura 32: Recepción y Generación de Mensajes de Control para tres (3) Instancias MPCP en modelo de algoritmo DDSPON. Tasa de Generación de Tráfico self-similar: 100 pk/seg. $H = 0.8$	65
Figura 33: Recepción de Mensajes de Control <i>Report</i> como función del tiempo para las 3 primeras instancias del OLT en modelo de Red TDM-EPON con DBA DDSPON. Tasa de Generación de Tráfico self-similar: 100 pk/seg. $H = 0.8$	66
Figura 34: Tamaño Medio de la cola vs. Carga de la Red para TDM-EPON con DBA fijo.	69
Figura 35: Retardo Medio de Paquetes vs. Carga de la Red para TDM-EPON con DBA fijo.	70

Figura 36: Retardo End to End vs. Carga de la Red para TDM-EPON con DBA fijo.	70
Figura 37: Solicitud de Transmisión vs. Asignación de Transmisión para TDM-EPON con DBA Fijo.	71
Figura 38: Throughput vs. Carga de la Red para TDM-EPON con DBA Fijo.	71
Figura 39: Utilización vs. Carga de la red para TDM-EPON con DBA Fijo.....	72
Figura 40: Tamano Medio de Cola vs. Carga de la Red DDSPON y Fijo.....	72
Figura 41: Retardo Medio de Paquetes vs. Carga de la Red DDSPON y Fijo.	73
Figura 42: Retardo End to End vs. Carga de la Red DDSPON y Fijo.	73
Figura 43: Throughput vs. Carga de la Red DDSPON y Fijo.....	74
Figura 44: Utilizacion vs. Carga de la Red DDSPON y Fijo.....	74
Figura 45: Solicitud y Otorgamiento de transmisión en algoritmo DDSPON	75
Figura 46: Problema de Operación de algoritmo DDSPON para ONUs distantes. 77	
Figura 47: Retardo End to End vs. Carga de la ONU WDM – Fijo.	78
Figura 48: Retardo de Cola vs. Carga de la ONU WDM - Fijo	79
Figura 49: Throughput vs. Carga de la Red WDM – Fijo.....	80
Figura 50: <i>Reporting Process</i> de la ONU- DDSPON.....	85
Figura 51: Proceso q_1 de la ONU - DDSPON	85
Figura 52: Código de Programación de nuevo estado de proceso q_1 de la ONU - DDSPON	86
Figura 53; Código de programación de proceso <i>Gate Reception</i> de la ONU para DDSPON	86
Figura 54: Código de programación de proceso <i>DBA Agent</i> de la ONU para DDSPON	87
Figura 55: Código de programación de proceso <i>Gate Generation</i> del OLT para DDSPON	88

Figura 56: Código de programación de proceso *Report Reception* del OLT para DDSPON 89

LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

-A-

APON, ATM Passive Optical Network.

ATM, Asynchronous Transfer Mode.

-B-

BPON, Broadband Passive Optical Network.

-C-

CO, Central Office.

CSMA/CD, Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection.

-D-

DBA, Dynamic Bandwidth Allocation.

DDSPON, Distributed Dynamic Scheduling for EPON – Planificación Distribuida Dinámica para EPON.

DL, Down-Link – Enlace de bajada.

DSL, Digital Subscriber Line – Línea de Subscriptor Digital.

-E-

EPON, Ethernet Passive Optical Network.

-F-

FPP, Fractal Point Process.

-I-

IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers.

IPACT, Interleaved Polling with Adaptive Cycle Time.

-M-

MAC, Media Access Control Address.

MIT, Massachusetts Institute of Technology – Instituto de Tecnología de Massachusetts.

MPCP, Multi-Point Control Protocol – Protocolo de Control Multipunto.

MPCPDU, Multi-Point Control Protocol Data Unit – Unidad de Datos del Protocolo de Control Multipunto.

-O-

OLT, Optical Line Terminal – Terminal de Línea Óptica.

ONU, Optical Network Unit – Unidad Óptica de Red.

OPNET, Optimized Network Engineering Tools – Herramienta Optimizada de Ingeniería de Redes.

-P-

PFC, Proyecto de Fin de Carrera.

PON, Passive Optical Network – Red Óptica Pasiva.

PtMP, Point to Multi-Point – Punto a Multipunto.

PtP, Point to Point – Punto a Punto.

-Q-

QoS, Quality of Service – Calidad de Servicio.

-R-

RPG, Raw Packet Generator.

RTT, Round Trip Time – Tiempo de ida y vuelta.

-T-

TDM, Time Division Multiplexing – Multiplexación por división de tiempo.

TIC, Tecnologías de Información y Comunicaciones.

TQ, Time Quantum.

-U-

UL, Up-Link – Enlace de subida.

UPC, Universidad Politécnica de Catalunya.

-W-

WDM, Wavelength Division Multiplexing – Multiplexación por división de longitud de onda.

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

En respuesta al acelerado crecimiento que en los últimos años han experimentado las redes troncales de Internet *-en inglés: backbone-*, han surgido nuevas iniciativas y propuestas en torno al mejoramiento de las redes de acceso. Por otra parte, el desarrollo de nuevas aplicaciones multimedia, entre las que destacan video a la carta *-en inglés: Video on Demand VoD-*, aplicaciones de video conferencia, juegos interactivos, IPTV *-del inglés Internet Protocol Television-*, e-learning, entre otras, se ha traducido de forma directa en un aumento en la demanda de ancho de banda por parte de los usuarios finales. Las tecnologías de redes de acceso de mayor predominio implementadas hasta el momento, representadas por redes DSL *-del inglés: Digital Subscriber Line-* y redes de cable MODEM CM, son incapaces de ofrecer los requerimientos que en términos de ancho de banda demandan estas nuevas aplicaciones. La necesidad de encontrar una tecnología simple, escalable, económicamente viable y con elevadas prestaciones de ancho de banda, ha impulsado y orientado nuevos esfuerzos y recursos para el desarrollo de una nueva generación de tecnología de redes de acceso guiado, conocida como redes PON *-del inglés: Passive Optical Network-*, sistemas basados en el uso de fibra óptica.

En el presente proyecto se evalúan las prestaciones de las redes de acceso de nueva generación EPON *-del inglés: Ethernet Passive Optical Network-* a partir de un modelo desarrollado e implementado en el software de simulación de sistemas de comunicaciones OPNET Modeler. El objetivo es poner a disposición del área de investigación y desarrollo de tecnologías telemáticas, los resultados de las evaluaciones de una red EPON con tecnologías de acceso TDM y WDM y algoritmos de asignación de ancho de banda de ventana fija y DDSPON para así determinar las ventajas de esta arquitectura de red frente a otras tecnologías vigentes.

Es importante señalar que este es un proyecto coordinado de tres estudiantes de la Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela bajo la supervisión de la profesora Mónica Huerta y Marilet De Andrade.

1.2. Antecedentes

La tecnología de Redes Ópticas Pasivas PON ha sido considerada una alternativa para el problema de la última milla desde la década de los ochenta. En 1988, aparece una de las primeras publicaciones del grupo de investigación de British Telecom en el que describen el método de telefonía PON (Kramer & Tamaka, *Advances in Optical Access Networks*, 2005). Sin embargo, no es hasta la década de los noventa con el acelerado crecimiento de las demandas de

nuevos servicios de internet, que se incorpora como una de las tecnologías más representativas de la nueva generación de redes de acceso, basadas en el uso de fibra óptica. En el año 2001 el grupo de trabajo denominada Ethernet en la Primera Milla, dio inicio al desarrollo del estándar IEEE 802.3ah, clausula que fue finalmente publicada en Junio del año 2004. Ariel Maislos, Lior Khernosh, Yukihiro Fujimoto, Gerry Pesavento, Glen Kramer entre otros, son algunos de los científicos que a través de sus trabajos de investigación han dado soporte a la evolución de esta tecnología de nueva generación.

Los más recientes trabajos de investigación de numerosos científicos y grupos de investigación de Universidades e Institutos Tecnológicos alrededor del mundo, se han orientado al estudio de algoritmos de distribución de ancho de banda (DBA) que optimicen las prestaciones de la red de comunicaciones, considerando este un aspecto que permaneció fuera de la cobertura del estándar IEEE 802.3ah. El algoritmo de ventana fija, IPACT, de sondeo cíclico propuesto por C. Assi et al, entre otros, son algunos de los algoritmos que se han propuesto para la asignación de ancho de banda en sistemas de redes EPON. En el año 2007 un equipo de investigación de la Universidad Politécnica de Catalunya propuso un método de asignación de ancho de banda inmediato *DDSPON* –del inglés: *Distributed Dynamic Scheduling for Passive Optical Network*-. La motivación de este proyecto surge a partir de la necesidad de determinar las prestaciones de este y otros algoritmos DBA en una red de comunicaciones EPON como solución próxima a los problemas de la última milla de acceso.

1.3. Organización Del Trabajo

El presente informe de proyecto de fin de carrera (**PFC**) está estructurado en ocho capítulos. El capítulo inmediato aborda los objetivos específicos del trabajo de investigación. El Capítulo III presenta los fundamentos teóricos, es decir, una descripción del principio de operación de redes EPON y algunos otros aspectos que deben ser manejados por el lector para dar soporte al trabajo desarrollado en el presente proyecto. Los capítulos IV, V y VI describen la metodología de trabajo, de forma específica el capítulo IV describe los procedimientos en forma sistemática llevados a cabo para concretar la implementación y diseño del modelo de red EPON con tecnología de acceso TDM y algoritmo de asignación de ancho de banda de ventana fija, el Capítulo V aborda la metodología desarrollada para la implementación sobre el modelo de red previo del esquema de asignación de ancho de banda DDSPON y el Capítulo VI describe el método de diseño para el modelado de una red de acceso EPON con tecnología de acceso WDM y algoritmo de asignación de ancho de banda de ventana fija. El Capítulo VII presenta los resultados, evaluaciones y análisis de cada uno de los escenarios simulados. Finalmente, se presentan las conclusiones en torno al desempeño, comportamiento y prestaciones de cada escenario de la red de acceso EPON estudiados.

CAPITULO II: OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Desarrollar en **OPNET Modeler** un modelo de red de comunicaciones Ethernet Óptica Pasiva de nueva generación “**EPON**” –del inglés *Ethernet Passive Optical Network*-, basada en tecnología de acceso por multiplexación de tiempo “**TDM**” –del inglés *Time Division Multiplexing*-, e implementar y evaluar el algoritmo de planificación dinámica distribuida para redes ópticas pasivas “**DDSPON**” –del inglés: *Distributed Dynamic Scheduling for Passive Optical Networks*- desarrollado por la Universidad Politécnica de Catalunya para la asignación dinámica de ancho de banda.

2.2. Objetivos Específicos

- Adquirir conocimientos teóricos sobre redes de comunicaciones **EPON**.
- Desarrollar en **OPNET Modeler** la programación del modelo de una red de comunicaciones de nueva generación **EPON**, basada en tecnología de acceso **TDM** con algoritmo de asignación de ancho de banda de ventana fija extensible a **WDM**.
- Implementación del algoritmo **DDSPON** como mecanismo de asignación de ancho de banda.
- Desarrollar en **OPNET Modeler** la programación del modelo de una red de comunicaciones de nueva generación **EPON**, basada en tecnología de acceso **WDM** con algoritmo de asignación de ancho de banda de ventana fija.
- Estudiar y comparar las prestaciones de cada uno de los escenarios simulados, en base a la recolección de estadísticas que describan el comportamiento de la red.
- Obtención y análisis de los resultados obtenidos para el algoritmo **DDSPON**, comparando con algoritmo de asignación de ancho de banda fijo.

CAPITULO III: TECNOLOGIA DE REDES DE ACCESO PON

3.1. Primera Milla: Tecnologías de Redes de Acceso PON – Passive Optical Networks

La “Primera Milla” antes conocida como la “Última Milla”, se refiere a la red de acceso del suscriptor, es decir, la infraestructura de comunicaciones que conecta la Oficina Central del Proveedor de Servicios (**CO**), –del inglés: *Central Office, Oficina Central*- con los suscriptores residenciales o empresariales. Las tecnologías que se desarrollen para proveer acceso a nivel de la “Primera Milla”, deben satisfacer los requerimientos y necesidades en términos de ancho de banda y coste, de los usuarios finales. En respuesta al acelerado ritmo de crecimiento del tráfico de data, y las limitaciones que las tecnologías ya existentes presentan para proveer al usuario final de éstas prestaciones, se ha considerado la incorporación de redes de fibra óptica en la “Primera Milla” de acceso del usuario.

La fibra óptica ofrece características ideales para servicios de banda ancha que integren voz, data y video, a distancias de veinte (20) kilómetros en la red de acceso del suscriptor. Es por ello, que se ha considerado la incorporación a la red de acceso de tecnologías basadas en el uso de fibra óptica, como por ejemplo las redes *PON*, del inglés –*Passive Optical Networks*-. Lo que en principio resulta atractivo de esta nueva generación de tecnologías es que la fibra óptica versus otros medios de acceso guiados, ofrece ventajas en términos de capacidad del canal (ancho de banda), confiabilidad, peso y tamaño; características que, de forma directa o indirecta benefician tanto al operador como a usuarios finales, en términos de mantenimiento, prestación de servicios multimedia, entre otros.

Para el despliegue de fibra óptica como tecnología en la red de acceso se presentan tres (3) posibles escenarios o configuraciones: **PtP** –del inglés, *Point to Point, Punto a Punto*-, configuración activa y configuración pasiva (**PON**). La topología **PtP** –¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.- supone el despliegue de fibra óptica desde el **CO** hasta el usuario final, mientras que, la topología activa –¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.- incorpora al diseño, un concentrador, cuyo fin es disminuir el uso de fibra a lo largo del trayecto de la “Primera Milla”, requiriendo a su vez de alimentación remota. En la configuración activa se suele usar un elemento activo como un switch. Las Redes **PON** –Figura 3- superan las prestaciones de estas topologías al presentar una alternativa que incluye en su configuración un dispositivo óptico conocido como divisor óptico pasivo –en inglés: *passive optical splitter*-, el cual reduce el uso de fibra a lo largo de la red, elimina la necesidad de alimentación remota y disminuye el número de transceptores y terminaciones del **CO**.

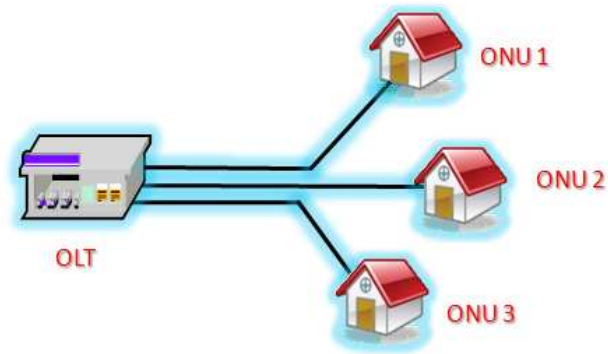


Figura 1: Configuración Punto a Punto Red EPON

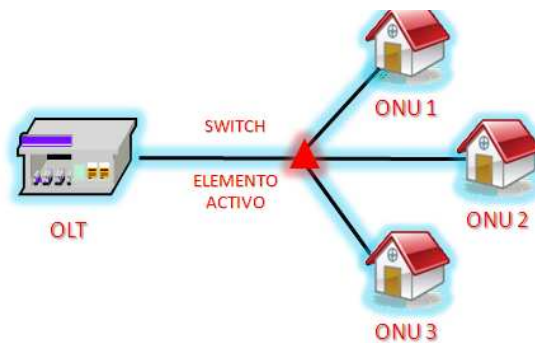


Figura 2: Configuración Activa Red EPON

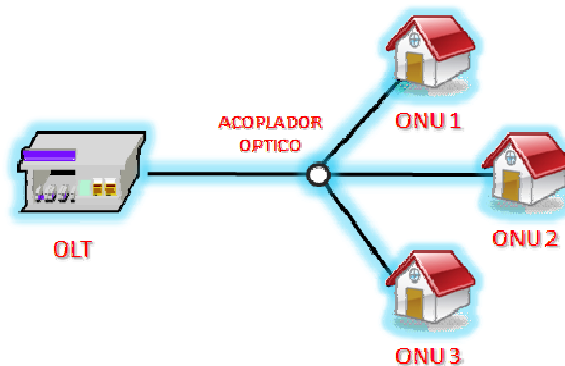


Figura 3: Configuración Pasiva de Red de Fibra Óptica

Las redes ópticas pasivas *PON* son configuraciones del tipo **PtMP** –del inglés: **Point to MultiPoint, Punto a Multipunto**-. Estas redes pueden estar dispuestas en árbol, anillo o bus. Adicionalmente, pueden implementarse diseños con enlaces redundantes, tal que, se provea de mayor seguridad al sistema de comunicaciones.

- **Elementos de un Sistema PON**

Una red de acceso de tecnología **PON** consta de un **OLT** –*del inglés: Optical Line Terminal, Terminal de Línea Óptica*- dispositivo que reside en el **CO** del Proveedor de Servicios (cabecera de red), un acoplador óptico, varios transceptores, y diversos dispositivos denominados **ONUs** –*del inglés: Optical Network Units*-, ubicados en una posición cercana a los usuarios finales. Típicamente pueden conectarse hasta un máximo de sesenta y cuatro (64) **ONU's** por dispositivo **OLT**. Por otra parte, el acoplador óptico es un dispositivo pasivo, que actúa como espejo, reflejando la señal óptica del canal de entrada hacia los “n” canales de salida, asociados a las fibras de los puertos de salida.

- **Transceptores**

La separación que existe entre las **ONU's** de un sistema de comunicación con el **CO** del proveedor de servicios tenderá a ser desigual, con lo cual, el nivel de potencia de la señal óptica recibida será distinta para cada ventana de transmisión de acuerdo a la atenuación que haya afectado a la misma. En el procedimiento de detección de unos ('1') y ceros ('0') lógicos, llevado a cabo en el receptor del **CO**, podría darse una lectura errónea si establecemos el umbral en base a pruebas sobre el dispositivo más lejano o bien del más cercano al terminal de línea óptica (**OLT**). Para evitar introducir errores de lectura de las tramas de datos, es necesario que el transceptor opere en modo ráfaga –*en inglés: burst mode*-, modo de operación que permitirá el ajuste automático del umbral, al inicio de una ventana de tiempo. La **ONU** por su parte, no requiere de un receptor operando en modo ráfaga, ya que, mantiene una lectura continua de los datos provenientes de la **OLT**, cuyo nivel de potencia es estable.

Otra alternativa sugiere que cada **ONU** sea capaz de ajustar su potencia de transmisión, tal que, la potencia recibida por el **OLT** de todas las **ONU's** sea la misma. La desventaja de esta propuesta es que implica una mayor complejidad en el diseño de los equipos transceptores y requiere protocolos de comunicación especiales para llevar a cabo la retroalimentación entre ambos nodos del sistema.

- **¿Por qué es Pasiva?**

Una configuración **PON** se dice que es *pasiva*, ya que está conformada por acopladores ópticos que no requieren de energía eléctrica para su operación, este principio ofrece a primera mano facilidades de mantenimiento, reducción de costos operativos y ventajas de instalación respecto a implementaciones del tipo activas.

- **Operación de Redes PON**

En la dirección de bajada (**DL: del inglés: Down Link**), es decir, desde el **OLT** hacia la **ONU**, una **PON** es una red punto a multipunto (**PtMP**). El **OLT** típicamente tiene disponible en todo momento el total de la capacidad del canal en la dirección de bajada. Sin embargo, en la dirección de subida (**UL: del inglés:**

Up Link), es decir, de la(s) **ONU(s)** hacia el **OLT**, dado el comportamiento multipunto a punto **MPtP** de la topología, debe implementarse algún algoritmo de separación de canal, que evite la colisión de los datos y optimice el uso de los recursos y capacidades del canal. Es importante señalar que, las propiedades direccionales de un acoplador óptico permiten que la transmisión de una **ONU** no pueda ser detectada por ninguna otra **ONU** de la red.

Existen diversos mecanismos para la separación de canales en la dirección de subida (**UL**), entre los de mayor implementación destacan:

- **WDM** –del inglés: *Wavelength Division Multiplexing*–: el principio de este mecanismo de acceso al medio se fundamenta en la operación a longitudes de onda diferentes, de modo que, no haya colisión entre la data de distintas **ONU's** al ser transmitidos de forma simultánea.
- **TDM** –del inglés: *Time Division Multiplexing*–: el cual sostiene el principio de multiplexación en tiempo, es decir, cada **ONU** debe transmitir en su propia ranura de tiempo –*timeslot*–, evitando la transmisión simultánea y por ende posible colisión y pérdida de datos. Cada **ONU** transmite dentro de un –*frame*–, que es un conjunto de “N” ranuras de tiempo, con “N” el número de **ONU's** en la red.

El primero de estos mecanismos, tiene una limitación de coste e implementación importante, en cuanto que, operar a distintas longitudes de onda exige equipos más complejos y costosos, así como el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan precisión en la operación de los mismos. Por otra parte, **TDM** como mecanismo de administración y acceso al medio, permite mantener la simplicidad de los equipos terminales tanto del usuario como del proveedor de servicios, ya que todos los equipos pueden transmitir a la misma longitud de onda, éste entre otros factores han contribuido a que la multiplexación por división de tiempo sea uno de los mecanismos más implementados en la actualidad.

Un aspecto que debe ser tomado en consideración dentro de los procedimientos operativos de la **ONU**, es que ésta deberá apagar el láser fuera de su ventana de transmisión, ya que, aún en ausencia de datos por enviar, los láseres generan emisión espontánea de ruido lo que podría afectar por ejemplo la señal proveniente de una **ONU** lejana, lo que se conoce como *efecto de captura*.

▪ **Ventajas y/o Limitaciones**

Las arquitecturas **PON** recientemente han captado especial atención de las empresas de desarrollo tecnológico, al representar una alternativa de nueva generación al llamado “problema de la primera milla”, ello en virtud de las numerosas ventajas que este atractivo sistema presenta:

- (a) Las redes **PON** cuadruplican el alcance de los sistemas de comunicaciones desde el **CO** hasta el usuario final, respecto a las tecnologías anteriormente implementadas, como por ejemplo **DSL**, pudiendo cubrir distancias de

- hasta veinte (20) kilómetros, sin necesidad de utilizar estaciones repetidoras.
- (b) Las redes **PON** minimizan el despliegue de fibra óptica tanto en la red de acceso del suscriptor como en el **CO**, reduciendo costos de instalación de los sistemas.
 - (c) Las redes **PON** frente a otras tecnologías basadas en el uso de cobre como medio guiado de acceso a la red, ofrecen oportunidades de envío de gran cantidad de datos (ancho de banda).
 - (d) Las redes **PON** permiten la sustitución de elementos activos de la red por elementos de tipo pasivo que simplifican el mantenimiento de la misma.
 - (e) Las redes **PON** permiten crecer a mayores tasas de transferencias y/o la adición de longitudes de onda de operación.

3.2. EPON: Ethernet Passive Optical Network

Dentro de los estándares de redes **PON** se encuentran las redes **EPON** – *del inglés: Ethernet Passive Optical Network-*, arquitectura que combina una configuración **PtMP** de bajo coste, con protocolo de transporte basado en tramas Ethernet. Bajo el mismo principio que rige las redes ópticas pasivas, estas redes emplean componentes pasivos en su infraestructura de comunicaciones.

Ethernet es una arquitectura de redes **LAN** –*del inglés: Local Area Network, Red de Área Local-* desarrollada en 1976, basada en tramas de datos. Esta tecnología define las características de cableado del primer nivel **OSI** y los formatos de trama del nivel de enlace. La comunicación entre un nodo y otro, se realiza enviando tramas Ethernet. Los datos que se desean transmitir se descomponen en una o más tramas con el formato que se muestra en la Figura 4.

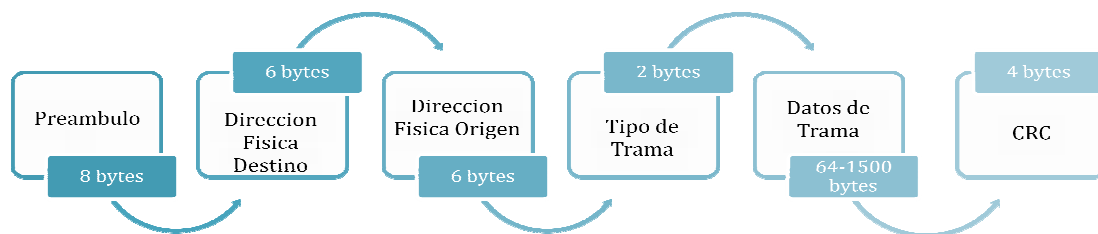


Figura 4: Estructura de una Trama Ethernet

El estándar *802.3* define una *trama Ethernet* con tamaño máximo de 1518 bytes y mínimo de 64 bytes. El campo *Preámbulo* es una secuencia de cincuenta y seis (56) bits con fines de sincronización. Los siguientes dos campos de la trama

están referidos a las *direcciones físicas (MAC)* del *origen* y *destino*, cada uno tiene una longitud de seis (6) bytes. La siguiente secuencia de dieciséis (16) bits *Tipo de Trama* está asociada al formato de transferencia de la *Data*, campo que contiene los datos transferidos desde el nodo origen hasta el nodo destino. El último campo contiene un valor de chequeo de redundancia para verificación de errores.

El estándar **IEEE 802.3** define dos configuraciones básicas para una red Ethernet. La primera de ellas se puede implementar sobre un *medio compartido* usando **CSMA/CD** –del inglés: *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection Protocol*-, método para el manejo simultáneo de demandas. En la otra configuración, las estaciones pueden estar conectadas a través de un *switch*, representando enlaces punto a punto. Las Redes **EPON** tienen la particularidad de no enmarcarse estrictamente dentro de una de estas configuraciones, sino que más bien pueden resultar de la combinación de ambas.

El comportamiento de una red EPON en la dirección de bajada (**DL**), es decir, desde el **OLT** hacia la **ONU**, es similar a la primera configuración Ethernet, es decir, una red de medio compartido sin el uso del método de acceso al medio CSMA/CD -Figura 5 y Figura 6-. En el OLT los paquetes son enviados por el **DL**, al alcanzar el divisor óptico de relación 1:N, se distribuyen los paquetes en modo –*broadcast*- a las “N” ONUs pertenecientes a la red. Cada dispositivo final deberá recuperar los paquetes en base a la dirección **MAC** –del inglés: *Medium Access Control, Control de Acceso al Medio*- y la etiqueta **LLID** –del inglés: *Logical Link Identifier*-. Al transmitir en **DL**, un aspecto a considerar sería la necesidad de desarrollar mecanismos de seguridad que eviten la intervención de tramas por parte de otras unidades ópticas.

Por otro lado, el comportamiento de la Red **EPON** en la dirección de subida (**UL**) es similar a aquel descrito por una arquitectura punto a punto (**PtP**) –Figura 5-, ya que, dadas las propiedades directivas de un acoplador óptico, los datos transmitidos por una **ONU** alcanzarán a ser detectados únicamente por el **OLT**, siendo esta transmisión transparente a las otras unidades ópticas pertenecientes a la red. Sin embargo, una diferencia importante del modo de operación del canal de subida de una Red **EPON** respecto al modelo **PtP**, radica en que la transmisión simultánea de tramas por parte de varias **ONUs** puede provocar la colisión y la consecuente pérdida de datos. El inconveniente es que las **ONUs** por sí solas no pueden detectar estas colisiones, por lo cual es necesario incorporar algún algoritmo de separación del canal, basada en técnicas de multiplexación en tiempo (**TDM**) o frecuencias (**WDM**), entre otros, tal y como se ha señalado en párrafos previos -ver: Capítulo Redes **PON**-.

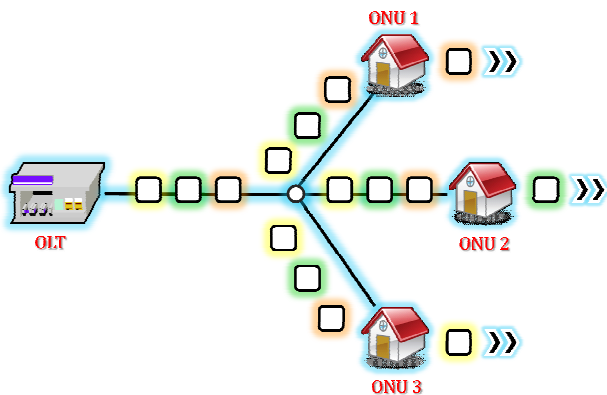


Figura 5: Punto a Punto –UL-

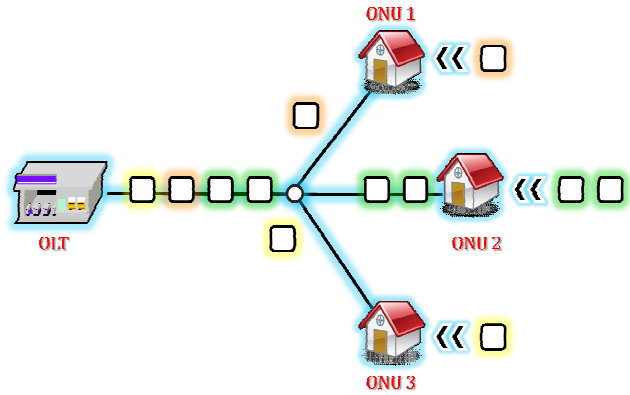


Figura 6: Medio Compartido – DL-

Basados en criterios netamente económicos y operativos, se suelen implementar las configuraciones de redes **EPON** con una fibra única, que permita la transmisión bidireccional de data. En este caso, son utilizadas dos (2) longitudes de onda: una para la dirección de subida (típicamente 1310 nm) y otra para la dirección de bajada (típicamente 1490 nm). Además, existe la implementación de sistemas de acceso de red separados, es decir, se distinguen dos (2) configuraciones una **PON** para el canal de subida y otra **PON** para el canal de bajada.

3.2.1 TDM-EPON: Red de Acceso EPON con tecnología de acceso por multiplexación de tiempo.

La tecnología de Red de Acceso **TDM-EPON** cumple con las características operativas descritas en líneas previas para **TDM-PON**, con la diferencia de que trabaja en base a la transmisión de tramas Ethernet. Las unidades ópticas de la red (**ONU**), deben estar sincronizadas con el terminal óptico (**OLT**), para que puedan ser asignadas ventanas de transmisión a la **ONU**, ventanas que representan el tiempo, fijo o variable (según el esquema de asignación) durante el cual el dispositivo podrá enviar tramas a la red. El principio de operación de estas redes sostiene que la **ONU** irá colocando las tramas que recibe de los suscriptores, en un buffer hasta la llegada de su ventana de transmisión, momento en el cual enviará al canal todas las tramas en cola que sea posible durante su tiempo de transmisión. En el caso de no haber suficientes tramas almacenadas en el buffer para completar la ranura de tiempo, se envían tramas de relleno –*idles*– de 10 bits.

3.2.1.1 TDMA-fijo

Este mecanismo de acceso múltiple sostiene el principio de asignación de ranuras de tiempo fijas para cada una de las unidades ópticas de la red. Esto supone independencia en la asignación de tiempo de transmisión respecto a otros factores como colas internas, tráfico, niveles de prioridad, entre otros.

G. Kramer en uno de sus trabajos [1] desarrolla el modelo matemático de este esquema de asignación de ancho de banda, pudiendo concretar que, no es posible determinar un tamaño fijo de la ventana de transmisión que garantice su máxima utilización, es decir, siempre habrá un remanente, cuyo valor medio depende de la distribución de tamaños de paquetes. Nuevos acercamientos a estos esquemas de acceso, condujeron al desarrollo de procedimientos que pretenden reducir el tamaño del remanente de la ranura de tiempo sin utilizar, al rellenar el espacio restante con tramas posicionadas en cualquier lugar de la cola que tengan el tamaño adecuado, disminuyendo así el tamaño del remanente, sin embargo, esto implica el envío desordenado de datos.

Desde el punto de vista de optimización del canal, el esquema de asignación de ventanas de transmisión estático, es decir, ranuras de tiempo fijas, no parece ser la mejor alternativa, ya que, algún suscriptor puede tener muchos paquetes en cola, mientras que otro inactivo o con menor tráfico de datos tiene asignado el mismo tiempo de transmisión, tiempo que, puede estar desaprovechando. Por ello, surgen nuevas propuestas de asignación de ventanas de transmisión dinámica basadas en el tamaño real de la cola de tramas de cada unidad óptica de la red (**ONU**).

Además de estos dos (2) esquemas de asignación, existen muchos otros relacionados con la prioridad del tráfico, calidad de servicio –**QoS**, del inglés: *Quality of Service*-, entre otros.

3.2.1.2 TDMA-variable

Al tratar esquemas de asignación de ventanas de transmisión *dinámicos* podemos distinguir dos modelos: descentralizado y centralizado.

El modelo descentralizado propone que las unidades ópticas de la red (**ONU**), sean quienes decidan cuándo y por cuánto tiempo transmitir. Previo al envío, deberán enviar un mensaje a las otras **ONUs** informando la cantidad de bytes que está por enviar al canal, de modo que la **ONU** que esté programada a continuación, pueda hacer un seguimiento de los movimientos de la **ONU** previa. Luego enviará sus datos, de forma que éstos lleguen al **OLT** inmediato a la culminación de las tramas de la **ONU** previa, evitando colisiones o desperdicio del ancho de banda. Una limitación importante de este modelo para su implementación en redes **EPON**, es que implica conectividad entre **ONUs**, y como se ha descrito en líneas anteriores las propiedades directivas de los acopladores ópticos no permiten que los paquetes transmitidos por una **ONU** lleguen a otra.

Esto nos lleva a estudiar un modelo que soporte las características operativas de las redes **EPON**: el modelo centralizado. En general, en una red de

acceso óptico (**PON**) independiente del estándar implementado, siempre habrá conectividad entre el **OLT** y todas las **ONUs** (canal de bajada: **DL**) o de cada **ONU** al **OLT** (canal de subida: **UL**). Esto hace suponer que el terminal de línea óptica (**OLT**) puede representar el dispositivo de arbitraje para el acceso compartido del canal, ya que, en cualquier dirección éste representa un nodo de conexión común. Una vez determinado que el **OLT** será el dispositivo encargado de administrar los recursos temporales de transmisión, se debe fijar el esquema de comunicación, tal que, ambos nodos intercambien información asociada a la solicitud del tamaño de ventana por parte de la **ONU** y la aprobación o indicación del tamaño real otorgado por el **OLT**. El protocolo de comunicación a implementar será un esquema de encuesta basado en mensajes de Solicitud y Otorgamiento. Un mensaje de solicitud es enviado por la **ONU** para reportar cambios en el estado de la cola de transmisión. El **OLT** será el encargado de procesar todos los mensajes de solicitud y en base a su algoritmo de asignación, enviar un mensaje de otorgamiento, asignando el tamaño y momento de inicio de la ventana de transmisión a cada **ONU**. Las ventajas de implementar un modelo de asignación de tiempos de transmisión dinámico y centralizado, es que el dispositivo árbitro (**OLT**) tiene conocimiento del estado de toda la red, pudiendo cambiar al esquema de asignación que haga mejor uso del ancho de banda, basado en las condiciones e información que maneje, además, esto permite que las unidades ópticas de la red (**ONU**) sean más simples en su diseño y en consecuencia más económicas.

Bajo las premisas del esquema de encuesta (solicitud-otorgamiento) surge el Protocolo de Control Multi-Punto, **MPCP** -del inglés: *Multi-Point Control Protocol*- desarrollado para el estándar IEEE 802.3ah.

3.3. MPCP: Multi-Point Control Protocol

El Protocolo de Control Multi-Punto (**MPCP**) es un mecanismo de control entre los nodos de la red, basado en un esquema de mensajes Ethernet: -Gate- y -Report- para lograr eficiencia en la transmisión de data en el **UL**. **MPCP** se implementa en la capa de Control **MAC** y opera en dos modos: auto-descubrimiento y normal.

En el modo auto-descubrimiento, el protocolo lleva a cabo los siguientes procedimientos:

- Detección de nuevas Unidades Ópticas (**ONU**) conectadas a la Red.
- Registro inicial de la **ONU**, a través del conocimiento de su dirección **MAC** y asignación de dirección lógica (**LLID**) –del inglés: *Logical Link Identifier*–.
- Cálculo de **RTT** –del inglés: *Round Trip Time, Tiempo de ida y vuelta*–, es decir, tiempo del trayecto entre el **OLT** y la **ONU**.

Funcionamiento del modo auto-descubrimiento

El **OLT** reserva una ventana de tiempo de inicialización, intervalo en el cual ninguna **ONU** previamente inicializada podrá transmitir. La ecuación 1 expresa el valor mínimo que pueda tener la ventana de auto-descubrimiento [T_{\min}].

$$T_{\min} = T_{\text{register_request}} + RTT_{\max} - RTT_{\min}$$

Ecuación 1: Valor mínimo de la Ventana de Descubrimiento

Donde, $T_{\text{register_request}}$ es el tamaño de la ventana de transmisión que una **ONU** no inicializada puede usar, RTT_{\max} es el tiempo de ida y vuelta máximo y RTT_{\min} es el tiempo de ida y vuelta mínimo.

Durante la ventana de descubrimiento el **OLT** envía un mensaje de inicialización *–Gate Discovery–* informando el momento de inicio y tamaño de la ranura de transmisión de autodescubrimiento. Con fines de sincronización, este mensaje lleva impreso la hora local. Solo las **ONUs** no inicializadas podrán responder a los mensajes de inicialización *–Gate Discovery–*. Una vez recibido el *–Gate Discovery–*, la **ONU** actualizará su reloj a la hora local impresa en el mensaje. Cuando el reloj local de la **ONU** alcance el tiempo de inicio de la ranura de transmisión, enviará su mensaje de solicitud de registro *–Register Request–*, llevando como contenido la dirección MAC de la fuente y un impreso de la hora local de envío de la **ONU**. Cuando el **OLT** recibe el mensaje *–Register Request–*, podrá completar el registro de una **ONU** no inicializada al tomar nota de su dirección MAC y **RTT**. Para realizar el cálculo del **RTT**, solo es necesario restar el tiempo actual del **OLT** menos la hora local de envío impreso en el mensaje de solicitud de registro.

Posteriormente el **OLT** envía un mensaje *–Register–*, asignando a la **ONU** una etiqueta lógica única y confirmando el estado del registro. Para completar el registro de la **ONU** a la red, el **OLT** envía un mensaje *–Gate Normal–* otorgando una ventana de transmisión donde la **ONU** podrá enviar un mensaje *–Register Acknowledge–* confirmando el conocimiento de su etiqueta lógica y estado del registro completado.

Considerando que, varias **ONUs** no inicializadas pueden responder simultáneamente a un mensaje de inicialización *–Gate Discovery–*, los *–Register Request–* podrían colisionar, esto provocaría que el **OLT** no registre a ninguna **ONU**. Si luego de un intervalo de tiempo la **ONU** no recibe un mensaje de registro *–Register–*, sabrá que su mensaje ha colisionado, por lo cual esperará un tiempo aleatorio y saltará varios mensajes de inicialización *–Gate Discovery–* antes de responder nuevamente a uno de ellos.

En el modo normal, se llevan a cabo las siguientes tareas:

- Asignación de ventanas de transmisión a las **ONUs** inicializadas.
- Envío de mensajes de control como mecanismo *–keep-alive–*.

Funcionamiento del Modo Normal

De la capa de control **MAC** del cliente, se pide la transmisión de un mensaje –*Gate*- hacia una **ONU** específica, mensaje que contiene información asociada al tiempo de inicio y duración de la ventana de transmisión concedida a la misma, así como un impreso de su hora local. Una vez verificada la dirección **MAC** y la dirección lógica, la **ONU** recibe el mensaje y programa sus registros de acuerdo al tiempo y duración cedida para la transmisión. Por otra parte, la **ONU** debe ser capaz de verificar sincronización con el **OLT**, comparando el reloj local con el tiempo impreso en el mensaje, si la diferencia se mantiene dentro de un umbral definido para el dispositivo, se asumirá que no hubo corrupción de la data y se culminará el proceso de reconocimiento del mensaje y actualización de la hora local con el impreso. De lo contrario, la **ONU** asumirá que perdió sincronización y se autoconfigurará a modo no inicializado. Es importante señalar que, el **OLT** debe considerar el tiempo de guarda –*del inglés: guard time*-, el cual representa el tiempo entre una y otra transmisión con el objetivo de evitar el solapamiento de las tramas.

En modo normal, el mensaje –*Report*- es enviado por la **ONU** junto a los paquetes de datos, con el objetivo de notificar el estado de las colas internas, cumpliendo con las premisas de un esquema de operación dinámico. Por otra parte, el protocolo **MPCP** define un temporizador de 50ms máximo entre mensajes –*Report*-, para poder considerar la conexión activa, esto significa que la **ONU** debe emitir informes de su estado de forma regular, este principio sostiene mantener la conexión activa **ONU-OLT** –*del inglés: Control Keep-Alive ONU-OLT*-.

El protocolo **MPCP** actúa como un mecanismo de control que informa la situación actual de las colas internas de las **ONUs** y notifica la asignación de ventanas de transmisión. Sin embargo, este protocolo por sí solo no es suficiente, es necesario implementar un algoritmo **DBA** –*del inglés: Dynamic Bandwidth Allocation, Asignación Dinámica de Ancho de Banda*- que determine en efecto la longitud del ciclo de transmisión. Este algoritmo puede proveer diferenciación de servicios al planificar tiempos de transmisión acordes al tráfico y ancho de banda suscritos.

3.4. Algoritmos de Distribución Dinámica de Ancho de Banda (DBA)

El Algoritmo de Distribución Dinámico de Ancho de Banda (**DBA**) representa el mecanismo de acceso al medio, encargado de asignar las ventanas de transmisión, en función de las colas internas de las **ONU's**, tomando en consideración variables como calidad de servicio, justicia entre otros. El objetivo es que la asignación de ventanas de tiempo se adapte de la forma más eficiente a las demandas actuales de tráfico de data de los nodos de la red. A continuación se presenta un resumen de los algoritmos **DBA** de mayor implementación en Redes de Acceso **EPON**.

3.4.1. Algoritmo de asignación de ancho de banda DDSPON: Dynamic Distributed Scheduler for EPON

El método de asignación dinámica de ancho de banda *DDSPON* fue propuesto por un equipo de investigación de la Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España. Un aspecto divergente de este algoritmo con respecto a los algoritmos de mayor implementación, es la distribución sobre todas las unidades ópticas de la red (ONUs) de la repartición de ancho de banda del canal, versus la versión centralizada que sugieren algoritmos como ASSI, IPACT, entre otros, donde la asignación de tiempos de transmisión está liderada por el OLT.

El algoritmo de distribución dinámica de ancho de banda DDSPON propone que las ONUs activas de la red sean las responsables de administrar los tiempos de transmisión propios para el canal de subida, mientras que se informe al OLT de tal asignación. Esta última unidad continúa teniendo el control del canal, ya que centraliza las asignaciones de ventanas de todas las ONUs y a través del mensaje de control GATE cumple con el mismo esquema sugerido por el protocolo MPCP.

Este algoritmo sugiere que para el cálculo de la ventana de transmisión instantánea de cada ONU, el OLT debe proveer a esta unidad de información adicional, específicamente debe facilitar en uno de los campos reservados del mensaje de control Gate, el vector de pesos $[\Phi]$. Este vector representa en el cálculo de la ventana de transmisión una proporción de lo que se transmite. Por otra parte, con el fin de mantener actualizado el vector de pesos para nuevos ciclos en el OLT, cada ONU debe enviar como parámetro adicional del mensaje de control Report el nuevo peso estimado. Inicialmente, cada ONU tiene un peso nominal Φ predefinido. Cuando se desea distribuir ancho de banda por igual a las N ONUs, el peso nominal de cada ONU viene dado por la Ecuación 2: Peso Nominal para cada ONU con distribución equitativa.

$$\Phi_{nominal} = \frac{1}{N}$$

Ecuación 2: Peso Nominal para cada ONU con distribución equitativa.

Donde N es el número total de ONUs activas de la red. El peso nominal es un parámetro utilizado para obtener el tamaño de la ventana de transmisión instantánea de la ONU a través de la ecuación 3.

$$W_i(n) = \frac{\Phi_i}{\sum_{j=1}^N \Phi_{j(n-1)}} \cdot W_{max}$$

Ecuación 3: Ventana de Transmisión Instantánea - DDSPON

Donde W_i es el tamaño instantáneo de la ventana de transmisión de la i ésima ONU, Φ_i es el peso nominal de la i ésima ONU, N es el número total de

ONUs de la red, y W_{max} es la máxima ventana de transmisión, que corresponde al máximo ciclo T_{max} .

$$W_{max} = \frac{T_{max}}{N}$$

Ecuación 4: Ciclo Máximo - DDSPON

La metodología que sigue el algoritmo DDSPON para la asignación dinámica de ancho de banda se explica a continuación (De Andrade, Gutiérrez, & Sallent, 2007) [3]:

- (a) El OLT recibe un mensaje de control Report de la i ésima ONU, que contiene el tamaño de la ventana de transmisión solicitada para el n ésimo ciclo $R_i(n)$ y el peso $\Phi_i(n)$ para ese mismo ciclo. En base a esta información el OLT actualiza el vector de pesos que será proveído a las unidades de la red y envía un mensaje de control Gate a la ONU i otorgando una ventana de transmisión cuya longitud es equivalente a la ventana solicitada en el mensaje de control Report.
- (b) Cuando la i ésima ONU recibe un mensaje de control Gate, los datos son transmitidos en la ventana otorgada por el OLT. Luego, la ONU toma el vector de pesos y calcula la próxima ventana de transmisión máxima para el ciclo $n+1$ (ver ecuación 3). Posterior a este cálculo, se selecciona entre la ventana de transmisión estimada y el estado de ocupación de las colas, la menor solicitud y este representa el requerimiento de transmisión $R_i(n+1)$. Finalmente, la ONU envía en el mensaje de control Report el tamaño de la ventana requerida para la transmisión $R_i(n+1)$ junto al nuevo peso para el próximo ciclo, este se calcula a través de la ecuación 5

$$\Phi_i(n + 1) = \frac{R_i(n + 1) \cdot \sum_{j=1}^N \Phi_j(n)}{W_{max}}$$

Ecuación 5: Peso de ONU i para ciclo $n+1$

En el caso de operación inicial de la red, el peso es equivalente al peso nominal de la ONU. El proceso se repite para cada una de las ONUs conectadas a la red. Un aspecto interesante de este algoritmo es que siendo la ONU la unidad encargada de determinar la longitud de la ventana de transmisión, esta es seleccionada tal que arregle un número exacto de bytes evitando remanentes en la ranura de transmisión, situación que puede ser propiciada en el caso algoritmos centralizados.

3.5. TECNOLOGIA DE REDES DE ACCESO WDM-EPON: Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network

La tecnología de multiplexación por división de longitud de onda, **WDM** -del inglés: *Wavelength Division Multiplexing*-, representa una de las alternativas más atractivas para el soporte de servicios que demanden mayor ancho de banda. Esta tecnología representa una actualización de las redes basadas en acceso por multiplexación de tiempo de canal simple a una opción de canal múltiple. La red básica de tecnología WDM-EPON, sostiene el uso de una longitud de onda separada por cada conexión OLT-ONU, para cada dirección de transmisión, es decir, para el canal de bajada y subida – ver figuras 7 y 8 respectivamente-. Esto conlleva a incrementos en el costo de implementación ya que se requiere disponer en el OLT de dispositivos sintonizables o de arreglos de receptores sintonizados. El protocolo MPCP se extiende a redes con tecnologías WDM con el objetivo de informar a través de los mensajes de control, la longitud de onda de transmisión asignada por el OLT a la ONU.

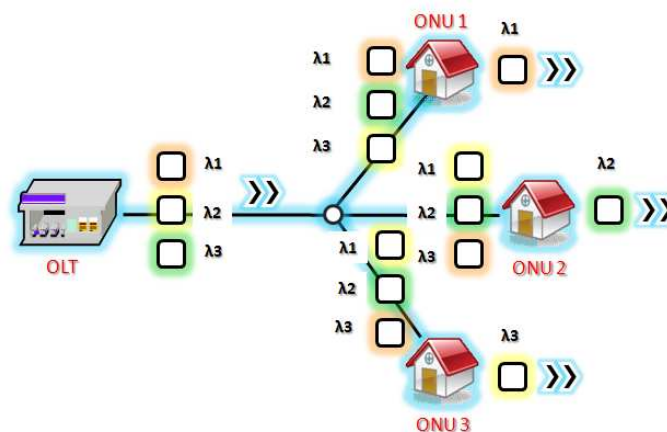


Figura 7: Red de Acceso EPON con tecnología WDM – Canal de Bajada

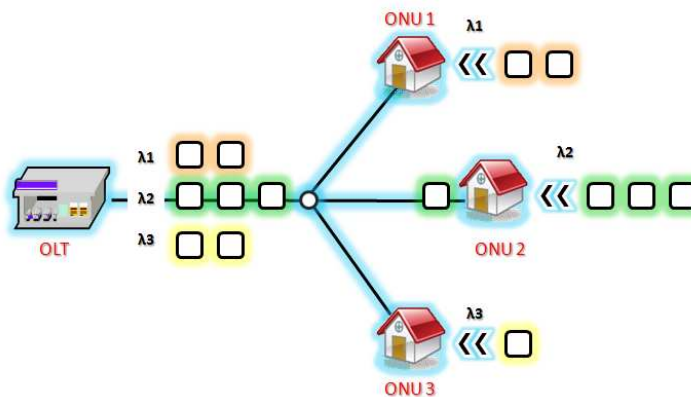


Figura 8: Red de Acceso EPON con tecnología WDM – Canal de Subida

Existen dos grandes planteamientos para la implementación de tecnologías WDM en redes de acceso EPON, la primera de ellas sugiere la asignación de un par de canales de longitud de onda diferente para cada ONU de la red, una para la transmisión en el canal de subida y otra para el enlace de bajada, mientras que la segunda propuesta sugiere combinar la tecnología de acceso TDM con WDM, es decir, un canal puede ser compartido en tiempo por varios nodos de la red. La primera de las propuestas de implementación de tecnologías WDM supone la ausencia de mecanismos de control de asignación de ancho de banda (WDM-DBA) pero trae implicaciones de costos más elevadas.

CAPITULO IV: DISEÑO E IMPLEMENTACION DE RED DE ACCESO EPON CON TECNOLOGÍA DE ACCESO TDM

4.1. Simulador de Sistemas de Comunicaciones OPNET Modeler

OPNET Modeler es una poderosa herramienta de simulación de sistemas de comunicaciones, que permite evaluar las prestaciones de una red bajo diversas condiciones de simulación como: flujos variables de tráfico, pérdida de paquetes, caídas de enlaces, entre otros. Este software fue desarrollado en el año 1984 en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) por investigadores y científicos del Laboratorio de Información y Decisión de Sistemas.

OPNET Modeler propone una jerarquía de diseño que rige los modelos implementados en este software. La organización en niveles de jerarquía del simulador permiten al usuario plantear las simulaciones desde el modelo de red, especificar su configuración en el modelo de nodos y programar el funcionamiento de cada parte en el modelo de procesos –ver figura 9-. En el modelo de red (Editor de Proyectos) se definen las redes y subredes del sistema a simular a partir de la interconexión de nodos. El modelo de nodos (Editor de Nodos) permite definir la estructura interna de cada uno de los componentes (nodos) de las redes, basados en la interconexión de módulos. Finalmente, el modelo de procesos (Editor de Procesos) es la base del sistema de modelado y permite al usuario programar directamente en lenguaje C++ las funciones de cada módulo, funciones que definen el comportamiento de la red. Además de estas aplicaciones, existen otros editores que permiten configurar componentes de la red o de la simulación propia, como por ejemplo editor de formato de paquetes, editor de enlaces, editor de estadísticas, entre otros. Por otra parte, OPNET Modeler cuenta con numerosas librerías y modelos predefinidos que facilitan el diseño y corresponden a modelos de redes con protocolos de comunicación estándar.

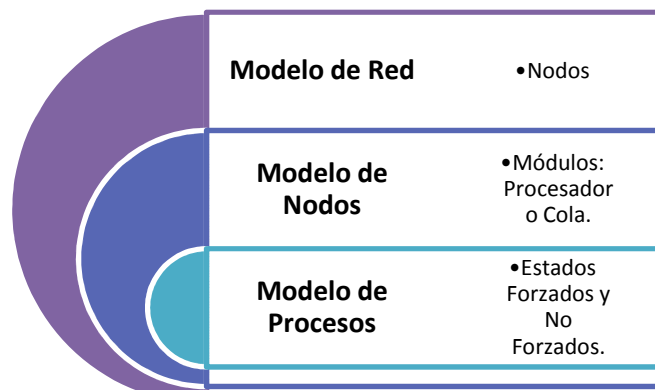


Figura 9: Niveles de Jerarquía de Diseño del Simulador OPNET Modeler.

Una de las mayores ventajas de OPNET Modeler es la interfaz con el usuario, es decir, es un simulador gráfico y la distinción en niveles de jerarquía facilitan el uso de esta herramienta. Los niveles de jerarquía anteriormente señalados se muestran directamente del simulador, en la figura 10. El funcionamiento del software de simulación es simple, en el modelo de red se deben definir los nodos y enlaces del sistema de comunicaciones, estos nodos a nivel del modelo de nodos están formados en su interior por varios módulos interconectados, estos módulos pueden ser de varios tipos: procesadores, colas, receptores o transmisores. Según la función de cada nodo, el usuario debe disponer una combinación lógica de módulos que ejecuten tal desempeño. Para la interconexión de módulos, OPNET Modeler maneja –streams- de paquetes y otros conectores lógicos. Cada uno de estos módulos está formado en su interior por una máquina de estados finita, que se define en el modelo de procesos como el flujo lógico de estados forzados y no forzados, que determinan el comportamiento de cada módulo. Un estado está formado por dos (2) partes: un ejecutable de entrada y un ejecutable de salida hacia la transición. Un estado forzado es aquel que ejecuta la programación de entrada, de salida y transita al siguiente estado de forma inmediata, mientras que, un estado no forzado ejecuta la entrada, espera una interrupción o invocación del proceso, es decir, se bloquea y es luego que ejecuta la programación de salida y así hacer la transición al siguiente estado. Los estados se interconectan por transiciones que pueden ser condicionales o incondicionales, y finalmente cada estado tiene espacio de programación en su ejecutable de entrada y de salida, que en manos del usuario a través del uso del lenguaje de programación C++ manipulan variables, paquetes, streams, entre otros, para completar la definición de la red.

Otra de las ventajas de esta herramienta de simulación es que brinda al usuario la posibilidad de acceder a los códigos fuente de los modelos de red predefinidos, permitiendo al usuario una mayor comprensión del principio de funcionamiento del software y manipulación de los mismos, para modelos con variaciones particulares.

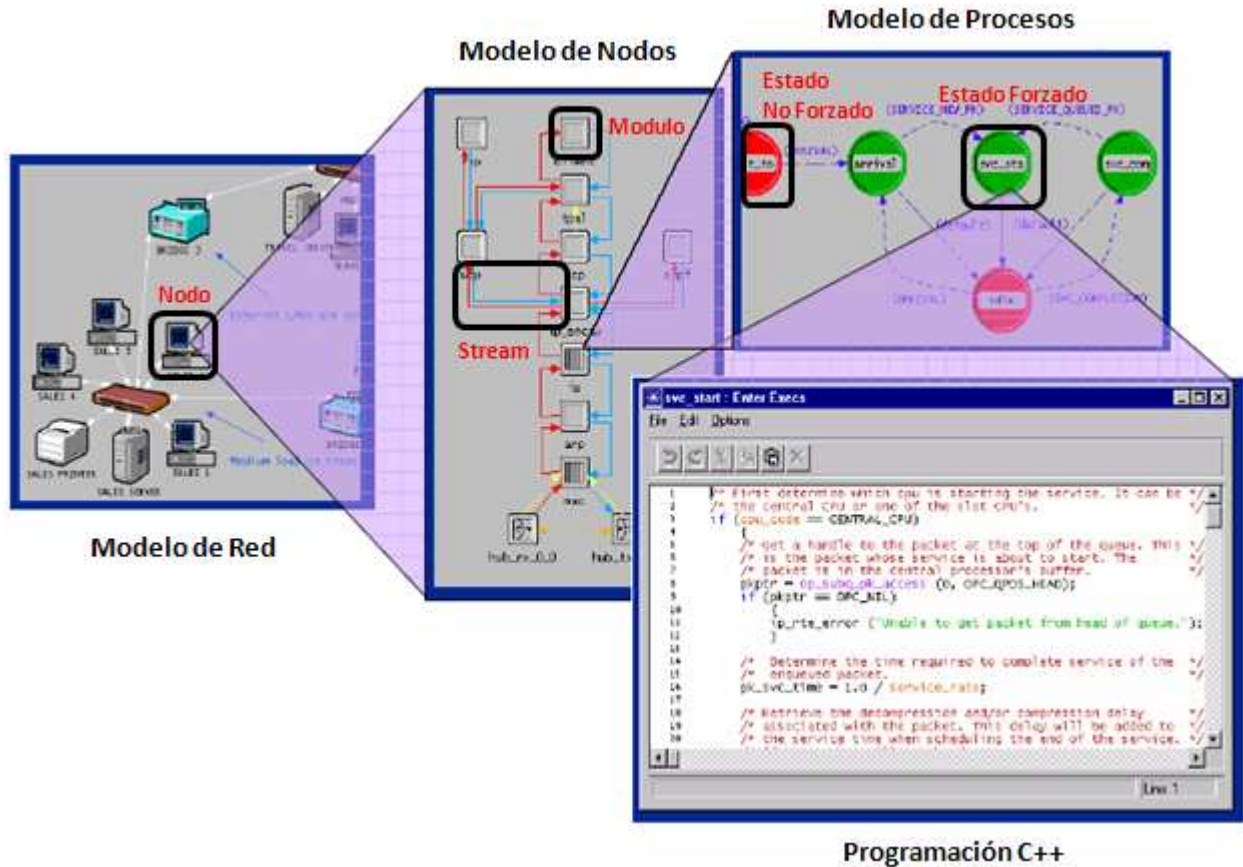


Figura 10: Principales Editores del Simulador OPNET Modeler

4.2. Fases para la implementación de un Sistema de Comunicaciones de Red EPON mediante el simulador OPNET Modeler.

Para la implementación del modelo de red EPON se utilizó la herramienta informática de simulación de sistemas de comunicaciones OPNET Modeler, software original de la compañía OPNET Technologies Inc., empresa líder en el área de redes y sus aplicaciones.

Este simulador permitió realizar un modelo de la red basado en niveles de jerarquía, que toman en consideración la estructura organizativa y operativa del software de simulación, con el fin de orientar el diseño al esquema de trabajo de esta poderosa herramienta.

El esquema de la figura 11 presenta a gran escala las fases para la implementación del modelo de red: diseño, implementación en OPNET Modeler, simulación, recolección de estadísticas y análisis de resultados. La figura 12 muestra en detalle las actividades que constituyen cada una de las fases para la implementación de un modelo de red EPON.

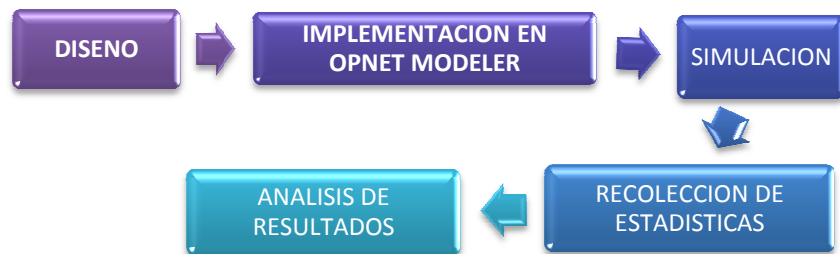


Figura 11: Fases para la Implementación de una red mediante el simulador OPNET Modeler.



Figura 12: Subfases del modelado de una Red EPON, mediante el simulador OPNET Modeler.

La fase de **diseño** constituye el eje del proceso de implementación, este contempla las características propias de la red, en combinación con el esquema operativo del software de simulación, es decir, se diseñó en base a la estructura de modelado de OPNET Modeler –ver *Capítulo IV: Sección 4.1 Simulador de Redes OPNET Modeler*-. De acuerdo a este último aspecto, se realizó el proceso de **diseño** a tres (3) niveles: nivel de nodos, nivel de módulos y nivel de procesos. Es importante señalar que, cada uno de estos niveles se diseñó en completa correspondencia con el estándar de redes de nueva Generación **EPON 802.3ah**, con miras a obtener un diseño con validez en el marco de los estándares y protocolos de comunicaciones Internacionales. Cada uno de estos niveles se describe en detalle en la siguiente sección del presente capítulo. Es importante señalar que la concepción del modelo en niveles de jerarquía ayudó a facilitar la modularidad de los procesos y escalabilidad del diseño.

La fase de **implementación en OPNET Modeler** consiste en implementar en la herramienta de simulación, el modelo diseñado en la fase previa. Se debe implementar en sentido inverso al de diseño, ya que la estructura jerárquica del software de simulación supone que un nodo está formado por módulos y cada módulo a su vez formado por un modelo de procesos –ver *Capítulo IV: Sección 4.1 Simulador de Redes OPNET Modeler*-.

La fase de **simulación** se orientó a la realización de pruebas aisladas de cada uno de los componentes de la red –ver *figura 13*-, para verificar posibles errores de implementación. La *figura 14* presenta el flujo lógico de actividades para la validación de los nodos de la red. Finalmente, se integraron todos estos componentes para realizar pruebas del sistema de comunicaciones de nueva generación **EPON**. Las simulaciones contemplaron pruebas del sistema en sus dos (2) modos de operación: descubrimiento y normal. La *figura 15* muestra el esquema de actividades para la validación de la red, entendida como la integración de los nodos que la conforman. Es necesario señalar que el proceso de simulación de la red se llevó a cabo de forma progresiva, incrementando la complejidad de la red con cada escenario, de esta forma la detección de errores se hace más simple y detallada. La *tabla 1* muestra los escenarios simulados para la ONU durante la prueba aislada de esta ONU, la *tabla 2* muestra los escenarios planteados para la prueba del OLT en su prueba independiente y finalmente la *tabla 3* describe los entornos de simulación para las pruebas de la red.

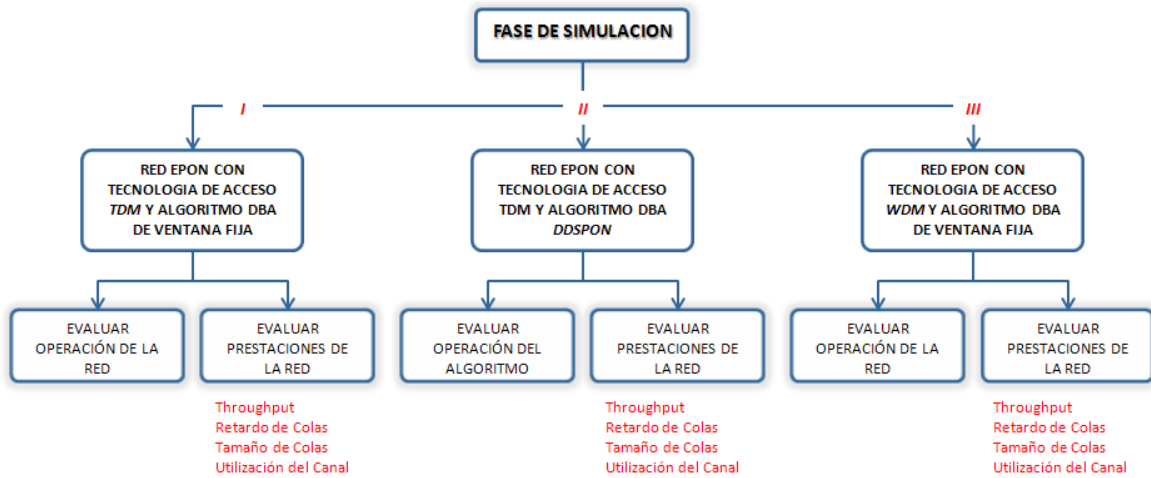


Figura 13: Diagrama de Flujo de Fase de Simulación

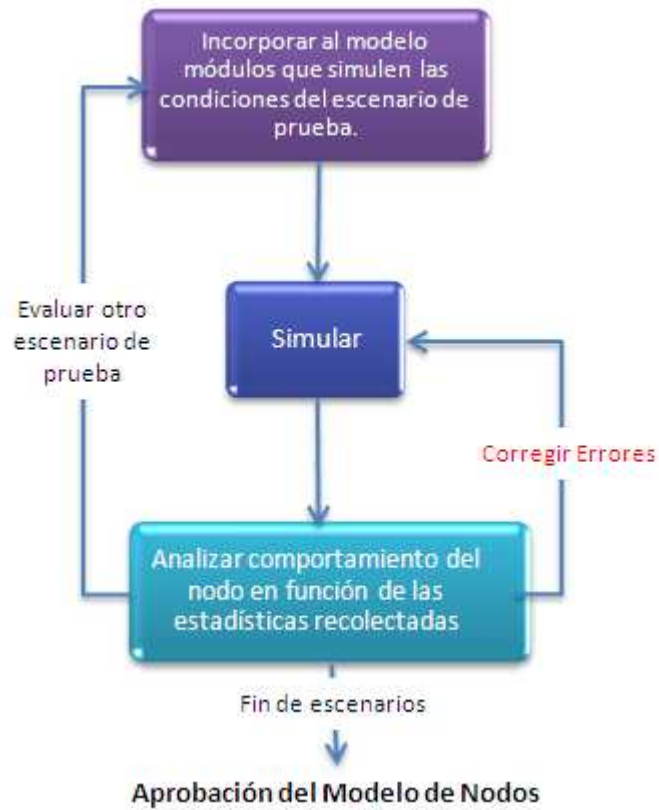


Figura 14: Esquema de Actividades de la Fase de Simulación para la validación de nodos

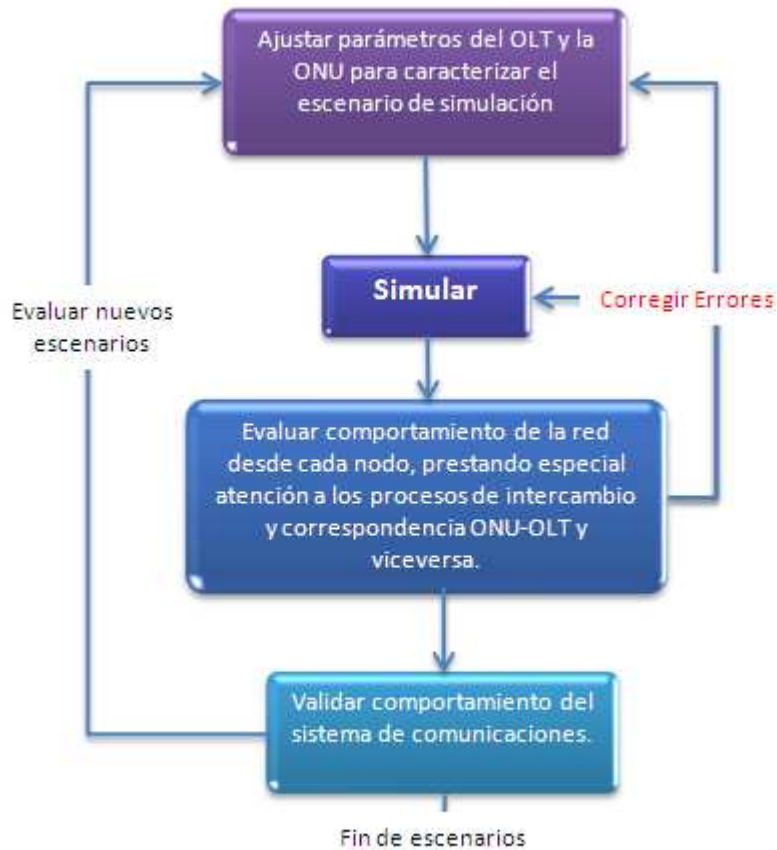


Figura 15: Esquema de Actividades de la Fase de Simulación para la validación del modelo de red.

#	Escenario
1	Condiciones de operación ideales. Protocolo MPCP en su versión más simple, es decir, no hay problemas de registro, no hay colisiones, pérdida de datos y sincronismo.
2	Comprobación de la destrucción de paquetes que no son destinados a una ONU.
3	Comprobar la recepción de paquetes que no sean tramas de control, es decir, con distinto código de tipo de trama.
4	Verificar el desregistro de la ONU, cuando se recibe un mensaje de control cuyo <i>timestamp</i> difiera en más de 8 TQs del reloj local de la ONU.
5	Verificación del descarte de futuros Discovery Gate una vez registrada la ONU.
6	Verificar que descarte mensajes de control Gate con ventanas de transmisión no válidas.

Tabla 1: Escenarios de Simulación de la Unidad Óptica de Red – ONU

#	Escenario
1	Condiciones de operación ideales.
2	Verificar escenario donde tras el envío de un mensaje de registro Register, la ONU no envíe o colisione su Register Acknowledge.
3	Verificar generación de MPCPDU de desregistro cuando el OLT detecta desincronización con ONU.
4	Verificar que invalide mensajes de solicitud de registro que lleguen fuera de la ventana de descubrimiento.

Tabla 2: Escenarios de Simulación del Terminal de Línea Óptica – OLT

#	Escenario
1	Prueba de Modelo de Red con una (1) ONU y una (1) instancia MPCP en el OLT. No se incorporó el dispositivo óptico. Fuente de tráfico simple.
2	Prueba de Modelo de Red EPON con tres (3) ONUs, tres (3) instancias MPCP e incorporación del dispositivo óptico con capacidad para tres (3) nodos. Fuente de tráfico simple.
3	Prueba de Modelo de Red EPON con dieciséis (16) ONUs, dieciséis (16) instancias MPCP y dispositivo óptico con capacidad para dieciséis (16) nodos, sin retardo basado en distancia, es decir, RTT nulo. Fuente de tráfico simple.
4	Prueba de Modelo de Red EPON con dieciséis (16) ONUs, dieciséis (16) instancias MPCP y dispositivo óptico con capacidad para dieciséis (16) nodos, con retardo basado en distancia. Fuente de tráfico simple.
5	Prueba de Modelo de Red EPON con dieciséis (16) ONUs, dieciséis (16) instancias MPCP y dispositivo óptico con capacidad para dieciséis (16) nodos, con retardo basado en distancia. Fuente de tráfico auto-similar.

Tabla 3: Escenarios de Simulación del Modelo de Red EPON

La fase de **recolección de estadísticas** se basó en la recolección de estadísticas susceptibles de análisis, que arrojaran información sobre el comportamiento y eficiencia de la red, con el objetivo de concluir en torno a la mejor caracterización del sistema y viabilidad del diseño.

Finalmente, la fase de **análisis de resultados** se basó en dar interpretación a las estadísticas recolectadas para cada escenario de simulación y comparar entre las distintas propuestas con el fin de determinar a nivel comparativo la red de mayor desempeño.

4.3 Descripción del modelo de red EPON

La arquitectura de red que se implementó en la herramienta de simulación avanzada OPNET Modeler, se definió en el Editor de Proyectos, es decir, a Nivel de Red, con tres (3) unidades: la Unidad Óptica –**ONU**– con un total de treinta y dos (32) nodos, un (1) Terminal de Línea Óptica –**OLT**– con capacidad para treinta y dos (32) *ONUs* y un (1) divisor/combinador óptico. La figura 16 muestra el esquema de la red *EPON* en el Editor de Proyectos de OPNET Modeler, con posibilidad de adaptar el número de *ONUs* operativas de la red.

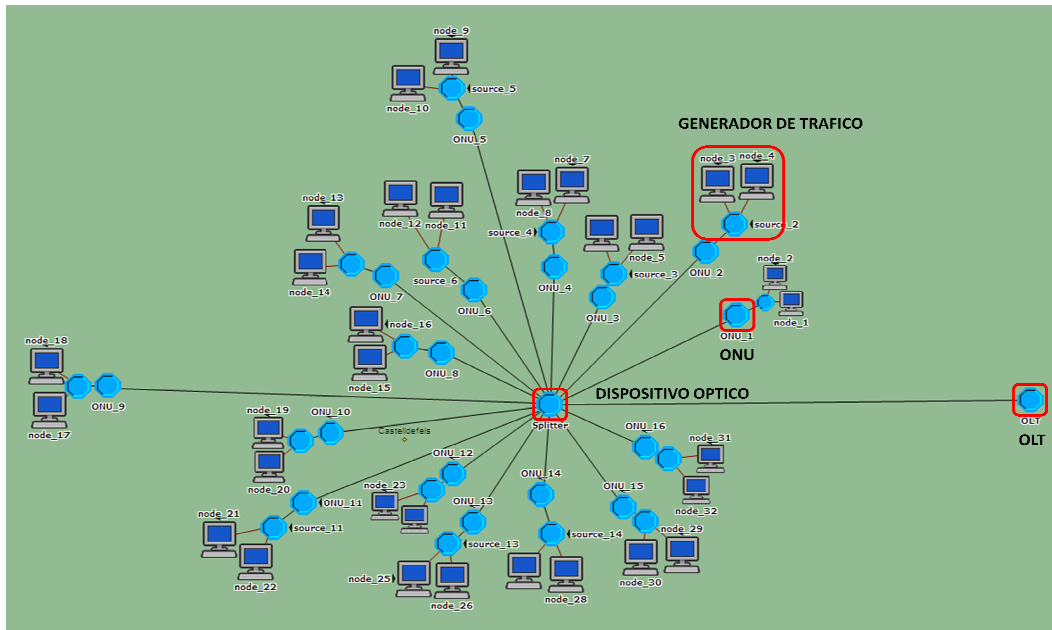


Figura 16: Modelo de Red EPON implementado en OPNET Modeler

Cada una de estas unidades está formada a su vez a nivel del editor de nodos, por módulos que llevan a cabo el procesamiento de mensajes en ambos modos de operación: descubrimiento y normal.

Para determinar en el diseño de la ONU los módulos que constituirían su estructura interna, se hizo en primer lugar una distinción de los procesos que ésta lleva a cabo y que contempla el estándar IEEE 802.3ah. De este proceso de interpretación se derivaron los módulos que lo integrarían –ver figura 17-. La importancia de distinguir con detalle durante la fase de diseño los grandes procesos que conforman a un nodo, derivan en el cumplimiento de los objetivos propuestos en el presente proyecto, relacionados con desarrollar un modelo de red que fuese de fácil manipulación, para que distintos usuarios puedan incluir algoritmos de distribución de ancho de banda y comparar bajo las mismas condiciones de operación, las prestaciones de cada escenario. El distinguir en procesos claves que permitieran la manipulación simple de determinados procesos tiene un efecto importante sobre el éxito de futuras extensiones del presente proyecto. En base a este estudio, la ONU queda formada por un total de diez (10) módulos a nivel del modelo de nodos, una (1) cola, dos (2) receptores y un (1) transmisor.

El mismo procedimiento de diseño fue llevado a cabo para determinar el modelo del OLT –ver figura 18-, quedando este conformado por un total de trece (13) módulos, un (1) receptor y un (1) transmisor. Es importante señalar que, el modelo propuesto supone la fácil adaptación de nuevos algoritmos de asignación de ancho de banda con la modificación del módulo planificador *DBA Agent*.

El modelo del dispositivo óptico, entendido como un combinador óptico en el canal de subida y un divisor óptico en el canal de bajada es simple en su diseño y quedó conformada por dos (2) módulos uno por cada canal de recepción, treinta y tres (33) receptores y treinta y tres (33) transmisores.

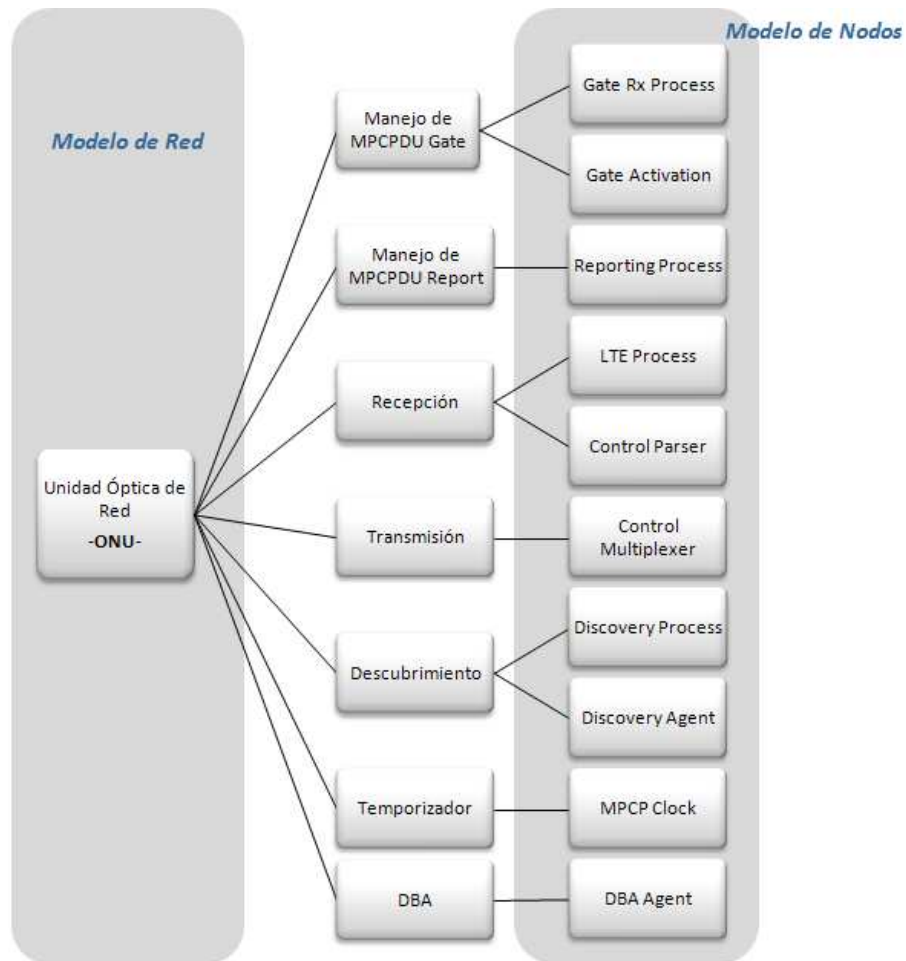


Figura 17: Módulos de la Unidad Óptica de Red - ONU

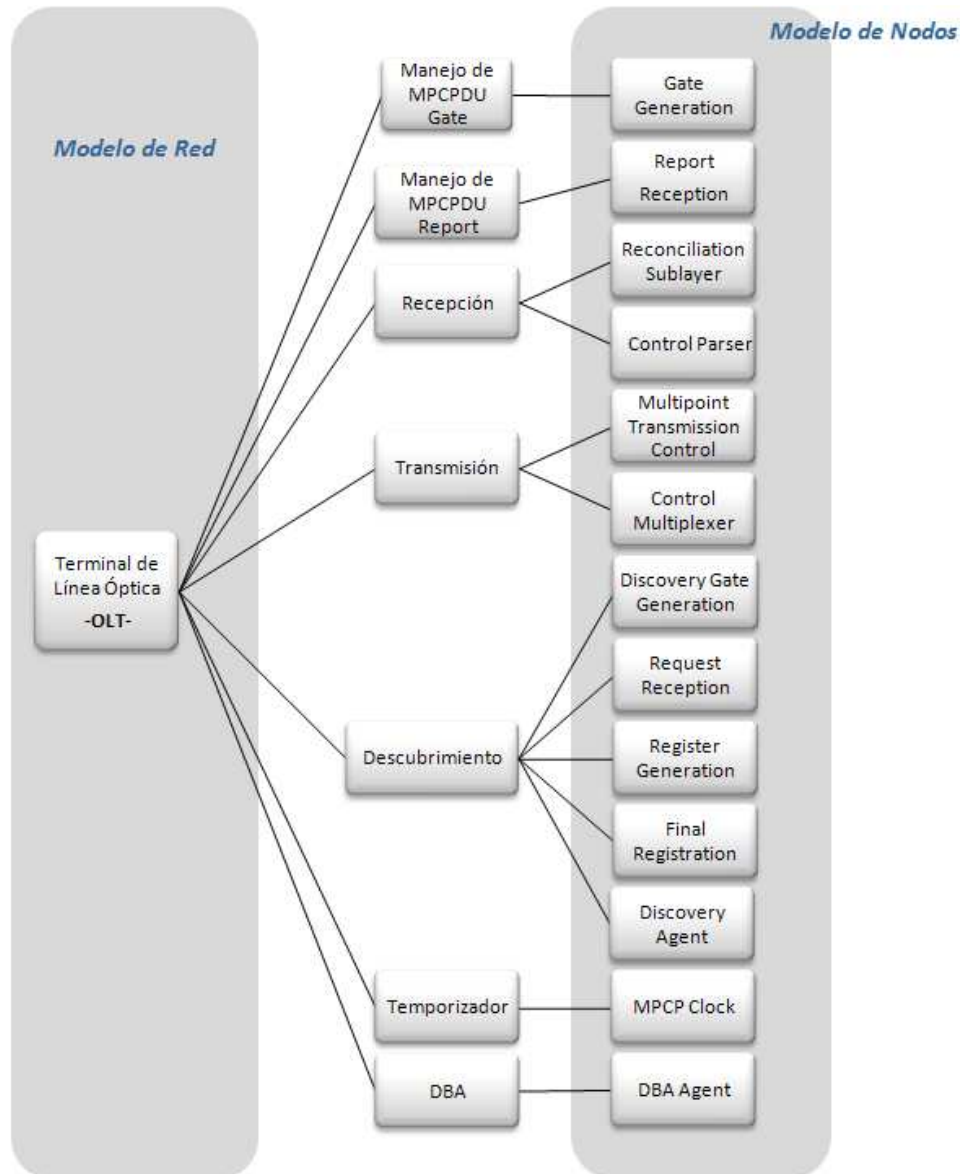


Figura 18: Módulos del Terminal de Línea Óptica – OLT.

En las siguientes secciones se describen las principales funciones de cada uno de los módulos que forman parte de los componentes del sistema de comunicaciones, permitiendo profundizar en el diseño de la red.

4.3.1 Unidad de Red Óptica – ONU

La unidad de Red Óptica, mejor conocida como *ONU* simula un nodo de usuario con funciones de operación distinguibles. Este nodo es el responsable de recibir mensajes de control GATE del OLT y configurarse para el envío de datos en la ranura de transmisión asignada. Por otra parte, debe enviar mensajes de

control REPORT que informen al OLT sobre el estado de ocupación de sus colas, con el fin de que el OLT continúe administrando el canal de subida de la forma más eficiente, para garantizar ancho de banda a cada uno de los dispositivos conectados.

Con el fin de llevar a cabo un diseño que cumpla con los lineamientos normalizados por el estándar IEEE 802.3ah, la Unidad Óptica de Red se compone de diez (10) módulos. La figura 19 muestra la implementación de la ONU en el modelo de nodos del simulador de sistemas de comunicaciones OPNET Modeler.

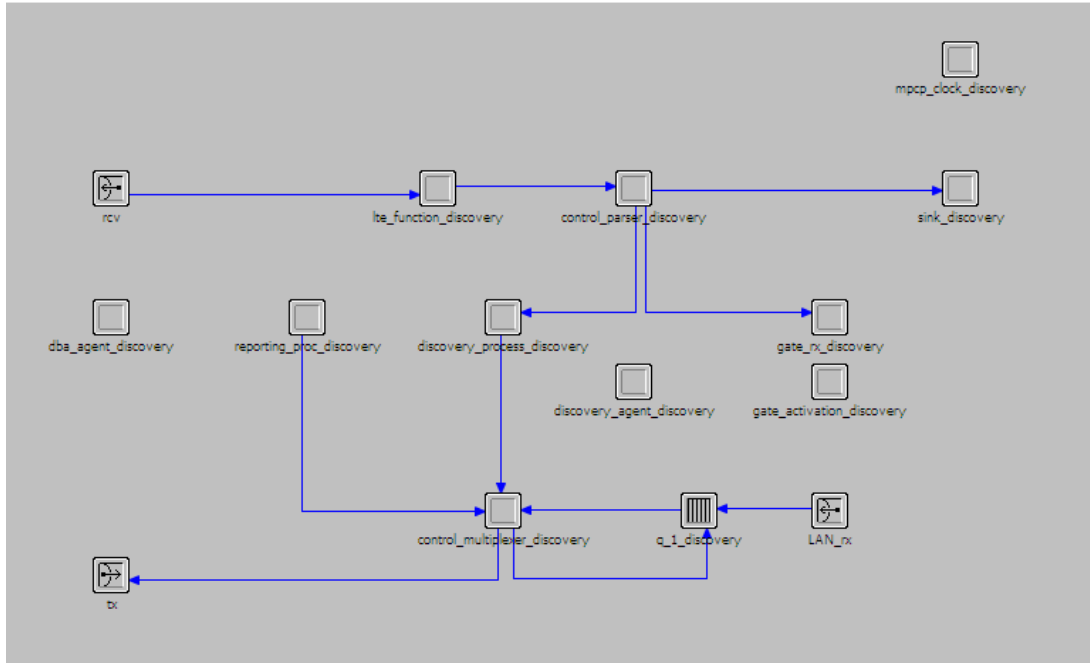


Figura 19: Implementación de ONU a nivel de nodos en OPNET Modeler

A continuación se describen las funciones de cada uno de los módulos implementados en el modelo de la unidad óptica de red.

■ LTE Process

El “LTE Process” es el módulo responsable de filtrar los mensajes recibidos por el canal DS en base al procesamiento de la etiqueta LLID. El criterio de filtrado es especificado en el estándar 802.3ah y sostiene que:

1. Si el campo “mode bit” es “0” y la etiqueta LLID coincide con la etiqueta previamente asignada a esta ONU el mensaje es aceptado.
2. Si el campo “mode bit” es “1” y el valor del campo LLID no coincide con la etiqueta asignada a esta ONU, el mensaje es aceptado.
3. Si la etiqueta LLID coincide con la etiqueta de envío BROADCAST (0x7FFF) el mensaje es aceptado.

En cualquier otra situación el mensaje es descartado por el módulo “LTE Process”. Es importante señalar que, el campo “mode bit” indica el

modo de emulación, siendo “0” el modo de operación “Point to Point Emulation” y “1” el modo de operación “Shared Medium Emulation”.

■ Control Parser

Este módulo es el encargado de recibir los paquetes emitidos por el OLT y dirigirlos a procesos de ejecución específicos para cada tipo – ver figura 20-. Estos mensajes pueden ser de dos (2) tipo: mensajes de control o data. El Control Parser debe ser capaz de distinguirlos en base a la lectura del campo “length/type”. Si el mensaje es de control, es decir, un MPCPDU válido, se debe verificar que el dispositivo continúe sincronizado con el Terminal de Línea Óptica (OLT), con el objetivo de ajustar el “timer” al tiempo estampado en el mensaje en el campo de “timestamp”, de lo contrario, este módulo deberá comunicar al proceso asociado al registro de la ONU “Discovery Process” que el dispositivo ha perdido sincronización, por lo cual deberá iniciarse un proceso de desregistro. En caso de certificar sincronización se deberá enviar el paquete a un proceso de ejecución específica según el tipo de MPCPDU, estos procesos pueden ser: “Discovery Process” o “Gating Process”, la tabla 4 asocia el tipo de MPCPDU a cada uno de los procesos al cual será remitido. Por otro lado, si el mensaje recibido es un dato este es entregado a la capa superior “Mac Client”, donde es redirigido a efectos de la simulación a un proceso que destruye el mismo, a la vez que registra estadísticas de interés para la simulación.

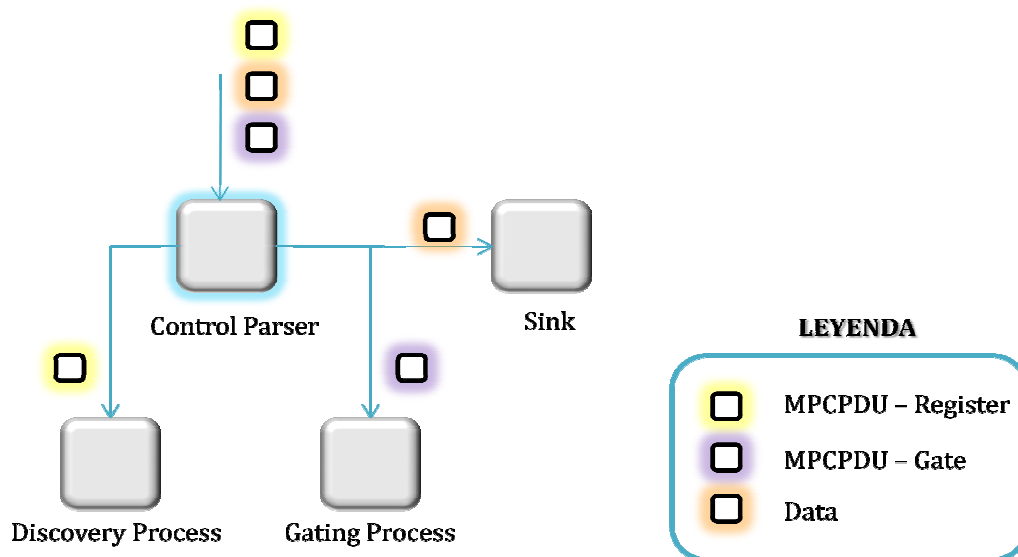


Figura 20: Principio de Operación del Control Parser de la ONU

<i>Mensajes de Control</i>	<i>Opcode</i>	<i>Proceso</i>
Register	5	Discovery Process
Normal Gate	2	Gating Process
Discovery Gate	2	Gating Process
Dato	N.A	MAC_Client / Capa Superior

Tabla 4: Relación Opcode-Proceso en Control Parser de la ONU

■ Control Multiplexer

El Control Multiplexer es el módulo encargado de transmitir los paquetes disponibles durante la ventana de transmisión. En otras palabras, este módulo garantiza el uso apropiado del canal por parte de la ONU, de acuerdo a la asignación de tiempo otorgada por el agente DBA del OLT. Por otro lado, este módulo debe serializar los paquetes, en base a un criterio de prioridades, dando mayor prioridad a los mensajes MPCPDU, es decir, a los mensajes de control sobre los de data. Además deberá encargarse de estampar la hora local en el mensaje MPCPDU con fines de sincronismo con el OLT. Como ilustra la figura 21 los paquetes pueden ser generados por “Mac Client” o procesos independientes de la ONU como el “Discovery Process” o “Reporting Process”, la tabla 5 asocia a cada proceso el mensaje generado que sirve de entrada al “Control Multiplexer”.

<i>Mensajes de Control</i>	<i>Opcode</i>	<i>Proceso Generador</i>
Report	3	Reporting Process
Register Request	4	Discovery Process
Register Acknowledge	6	Discovery Process
Data	N.A	MAC Client

Tabla 5: Relación Opcode-Proceso en Control Multiplexer de la ONU

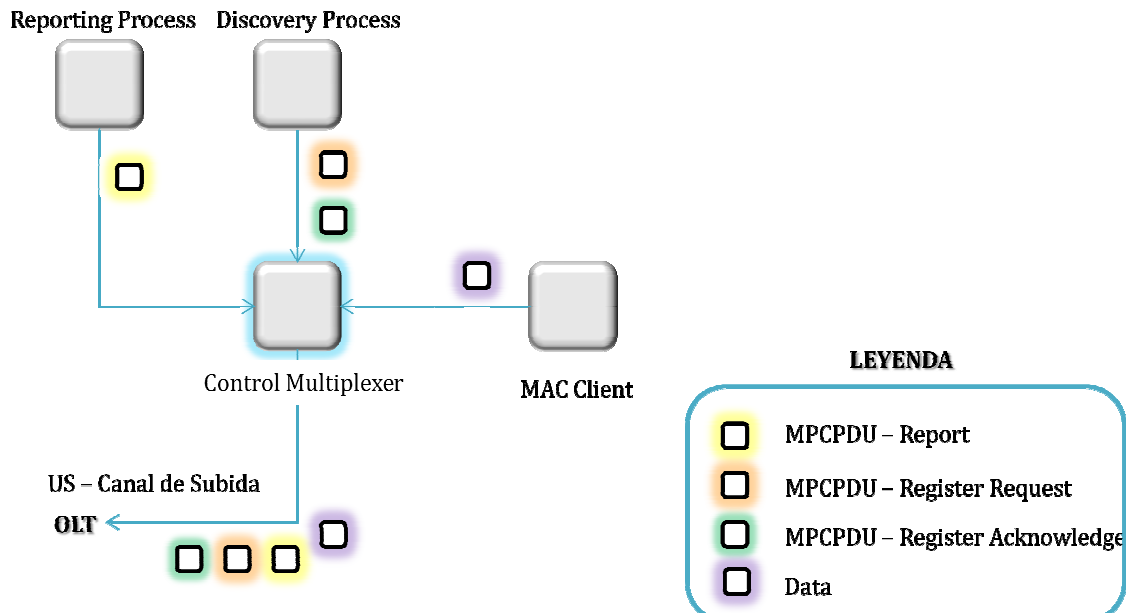


Figura 21: Principio de Operación del Control Multiplexer de la ONU

■ Gating Process

El "Gating Process" enmarca las operaciones de recepción y procesamiento del mensaje de control "Gate" emitido por el OLT. En correspondencia con el estándar IEEE 802.3ah se distinguen dos (2) procesos:

- (a) Gate Reception Process.
- (b) Gate Activation Process.

El "Gate Reception Process" es el módulo responsable de verificar la integridad del MPCPDU "Gate" recibido y almacenar en una estructura los "grants" otorgados por el OLT, a la vez que debe informar al "Gate Activation Process" la llegada del mismo. El "Gate Reception Process" procesa los mensajes de control "Gate" tanto de operación en modo normal como en modo descubrimiento.

El "Gate Activation Process" es el encargado de activar la transmisión de datos de acuerdo a la ventana otorgada por el OLT, esta activación se hace habilitando la bandera transmitAllowed, bandera que autoriza al proceso "Control Multiplexer" a iniciar la transmisión de data.

■ Reporting Process

El "reporting process" es el módulo responsable de generar mensajes de control que reporten el estado de ocupación de las colas de la ONU al OLT, con el fin de que sea otorgado según el criterio de asignación del "DBA Agent" una

ventana de transmisión a este nodo. Este módulo deberá generar un mensaje de control de tipo “report” en dos (2) situaciones:

- (1) Cuando el “DBA Agent” solicite la generación de un reporte.
- (2) Cuando haya expirado el timer asociado a la generación de “reports”, es decir, si transcurrido un tiempo predefinido (50 mseg) el “DBA Agent” no ha solicitado la generación de un “Report” el temporizador expira y provoca la generación de un mensaje vacío, como mecanismo “keep-alive”.

■ Discovery Process

El “Discovery Process” se encarga de manejar la fase de detección y registro de nuevas ONU’s a la EPON. En la ONU este módulo deberá llevar a cabo las siguientes operaciones:

- (1) Generación de mensaje de control “Register Request”, solicitando a la OLT registro a la red circundante.
- (2) Procesamiento del mensaje de control “Register” emitido por el OLT en respuesta a la solicitud de registro. Este procesamiento supone además la programación del módulo “LTE Process” para que acepte el tráfico de datos enviados por el canal UNICAST e identificado con la etiqueta “LLID” asignada en este proceso de descubrimiento.
- (3) Generación de mensaje de control “Register Acknowledge”, confirmando registro de la ONU a la red.

■ MPCP Clock

El “MPCP Clock” representa el reloj de la ONU. Este proceso se encarga de incrementar y mantener actualizada la variable localTime. La variable localTime cuenta en unidades de TQ’s, siendo una (1) unidad equivalente a 16 nanosegundos del “timer” del simulador. Por otra parte, este módulo es el encargado de interrumpir al *Gate Activation* indicando el inicio de la ventana de transmisión.

■ Reporting Process

El “Reporting Process” es el proceso encargado de enviar los MPCPDU – Report, con información sobre el estado de ocupación de las colas al OLT, con el fin de solicitar al agente DBA tiempo para transmitir por el canal de subida. El “DBA Agent” de la ONU será la encargada de solicitar a este módulo la generación de mensajes de control de tipo “report”.

■ Discovery Process

El mecanismo de autodescubrimiento tiene como objetivo detectar ONU’s recientemente conectadas e iniciar el proceso de registro con el fin de conocer el

RTT y asignar una etiqueta lógica única (LLID) que permita establecer comunicación punto a punto entre ambos nodos de la red. El módulo de “Discovery Process” de la ONU es el encargado de recibir y procesar el MPCPDU – Register, asociando a su configuración la etiqueta lógica asignada y generando los mensajes de control “Register Request” y “Register Acknowledge” con miras a completar el proceso de autodescubrimiento.

■ Discovery Agent

Este módulo es el responsable de mantener actualizado el estatus de conexión y registro de la ONU. Por otra parte, se encarga de informar al módulo *Discovery Process* la disposición del nodo a registrarse al sistema y finalmente notifica el registro final del nodo a la red. Cualquier condición de desregistro es notificada al Discovery Agent.

■ DBA Agent

Este módulo se encarga de solicitar al *Reporting Process* la generación de mensajes de control de tipo “Report” al inicio de una ventana de transmisión, para el envío de información sobre el estatus de ocupación de las colas de datos de la ONU. Para el caso de DBAs descentralizados este módulo es el responsable de alojar el algoritmo de distribución de ancho de banda para la determinación de la longitud de la ranura de transmisión.

4.3.2 Terminal de Línea Óptica -OLT-

El Terminal de línea óptica conocido como OLT, representa el nodo de acceso de la red. En este nodo se centralizan las funciones de asignación de ancho de banda en el canal de subida *US*. El OLT es el responsable de recibir los mensajes de control REPORT, traducir las solicitudes de ancho de banda de las ONUs y asignar a través de un mensaje de control GATE una ranura de transmisión, que garantice una distribución eficiente del canal de subida y permita condiciones de operación óptimas. En el sistema de comunicaciones EPON existe un (1) solo OLT, con capacidad máxima de sesenta y cuatro instancias de ONUs, se da la posibilidad al operador de ajustar las instancias activas en la red.

El diseño e implementación de este nodo bajo las normativas y estándares de la IEEE 802.3ah, condujeron a la definición de trece (13) módulos, cuyas principales funciones son descritas a continuación.

■ Control Parser

Este módulo es el responsable de analizar los paquetes recibidos, distinguiendo entre mensajes de control y mensajes de datos. En el caso de los mensajes de control, este dirige el paquete según el código de operación al módulo encargado del procesamiento y manipulación del mismo, es decir, al proceso asociado a este MPCPDU. Por otra parte, este módulo es el encargado

de calcular el RTT entre el OLT y la ONU, bajo el mecanismo MPCP. Con la llegada de cada mensaje de control el RTT es re-calculado y comparado con el RTT previo, si la diferencia absoluta entre estas dos (2) mediciones supera el umbral predefinido para el OLT, se acierta una condición de error que origina la invocación del módulo *Discovery Agent* solicitando el desregistro de la ONU.

■ Multipoint Transmission Control

El OLT es el único dispositivo transmitiendo en el canal de bajada, sin embargo, esta contiene tantas instancias MPCP como ONUs tenga la red. Cada una de estas instancias actúa de forma independiente generando mensajes de control y de datos, como resultado de la dinámica de comunicación. Por tal motivo, debe existir un mecanismo que regule la transmisión de cada instancia, con el objetivo de evitar colisión y pérdida de paquetes. El Multipoint Transmission Control tiene una visión global de todas las instancias MPCP del OLT, y se responsabiliza de otorgar permisos de envío a los módulos de transmisión (control multiplexer) de cada instancia MPCP, garantizando que por tiempo solo una instancia se encuentre transmitiendo en el canal de bajada. Este módulo se comunica con el módulo de transmisión de una instancia MPCP a través de las variables: *transmitPending*, que indica que hay una transmisión pendiente, *transmitInProgress*, que indica que hay una transmisión en curso y *transmitEnable*, que indica que se ha habilitado la transmisión para esa instancia. Es importante señalar que, el estándar IEEE 802.3ah no sostiene criterios sobre qué instancia debe transmitir, en el caso de que varias instancias tengan mensajes pendientes, es por ello que se ha empleado el criterio de round-robin con el objetivo de planear la transmisión de forma equitativa.

■ Control Multiplexer

Este módulo tiene funciones similares al control multiplexer de la ONU. El control multiplexer es el responsable de priorizar y serializar los paquetes recibidos, para enviarlos por el canal de transmisión una vez autorizados por el módulo de arbitraje –Multipoint Transmission Control-. Si el mensaje a transmitir es un mensaje de control, este módulo es el encargado de estampar la hora actual del OLT en el campo –timestamp- del MPCPDU.

■ Gate Generation

Este módulo existe de forma independiente para cada instancia MPCP del OLT y es la responsable de generar los mensajes de control Gate, que tienen como objetivo notificar a la ONU la ventana de transmisión otorgada. Este proceso es activado por el Agente DBA, quien ordena la generación de un mensaje de control Gate. Los mensajes Gate también son utilizados como parte del mecanismo –keep alive-, para informar a la ONU que la instancia asociada a ella en el OLT está funcionando de forma adecuada. En consecuencia, si el proceso de generación de

un Gate luego de un cierto periodo de tiempo definido no ha sido invocado por el Agente DBA, este genera un mensaje de control de forma automática.

Es importante señalar que el estándar sugiere que una vez autorizada la generación de un Gate se planifica y estampa el tiempo de inicio de la ranura de transmisión, sin embargo, los procesos de simulación determinaron un cambio en la secuencia lógica de este procedimiento, es decir, no se estampa ni planifica el tiempo de inicio de una ventana de transmisión en el momento de generar el mensaje Gate sino justo antes de que sea transmitido por el *Control Multiplexer*, de lo contrario, dependiendo del tiempo que este deba esperar en cola a que sea su turno de transmisión podría llevar estampado un tiempo de inicio que será invalidado por la ONU, al no cumplir con el umbral de inicio que le caracteriza.

■ Report Reception

Este módulo existe de forma independiente para cada instancia MPCP del OLT y es el responsable de recibir los mensajes de control Report y enviar la información recibida al Agente DBA, para planificar la próxima ventana de transmisión a otorgar. Este proceso tiene asociado un temporizador que se activa con la recepción de un mensaje de control, si este temporizador expira, provoca el desregistro de la ONU asociada a tal instancia. La expiración de este contador se traduce en tiempo entre la llegada de mensajes de control Report y está establecido en un (1) segundo.

■ Discovery Gate Generation

Este módulo es el responsable de la generación de mensajes de control de tipo *Discovery Gate* que indique tiempo de inicio y duración de la ventana de descubrimiento. El *Discovery Agent* es el responsable de invocar a este módulo para la generación del MPCPDU. Cada instancia MPCP cuenta con un módulo independiente, sin embargo, solo una de estas instancias será la responsable de emitir el mensaje de control. Para facilidad de los usuarios se ha configurado el parámetro MPCP_SENDER en el módulo *Discovery Agent*, atributo que indica el número de instancia responsable de generar el mensaje Gate Discovery para el tiempo de descubrimiento. El *Discovery Gate Generation* además debe informar al módulo *Register Reception* el tiempo de inicio y fin de la ventana de descubrimiento, con el objetivo de recibir únicamente mensajes de solicitud de registro que lleguen al OLT dentro del tiempo reservado.

■ Request Reception

Este módulo existe de forma independiente para cada instancia MPCP del OLT y es el responsable de recibir el mensaje de control de solicitud de registro – register request- dentro de la ventana de descubrimiento. Una vez recibido este mensaje, se invoca al Agente Discovery, módulo responsable de generar una etiqueta de identificación lógica única para la ONU que solicita incorporarse a la

red. Si el mensaje es recibido fuera de la ventana de descubrimiento este es automáticamente descartado.

■ Register Generation

Este módulo es el responsable de generar un mensaje de control Register tras la solicitud del Agente de Descubrimiento. El mensaje de control –Register– según la configuración de uno de sus bits indica la condición de registro o desregistro, esta información es proporcionada por el agente de descubrimiento.

■ Final Registration

Este módulo es responsable de generar un mensaje de control Gate a una ONU específica, que otorgue tiempo de transmisión para el envío de un mensaje de confirmación de registro. Por otra parte, es el encargado de recibir el mensaje de confirmación de registro emitido por la ONU, y completar el registro de la misma a la red. El módulo –final registration– existe de forma independiente para cada instancia MPCP del OLT.

■ Discovery Agent

Es el módulo encargado de iniciar rondas de descubrimiento. Indica cuándo debe iniciarse una ventana de descubrimiento para que las ONUs no conectadas puedan registrarse a la red. Cuando este agente detecta el momento de inicio de un periodo de descubrimiento invoca al *Discovery Gate Generation* para iniciar el proceso. Este módulo es el responsable de asignar etiquetas únicas de identificación lógica a cada ONU del sistema.

■ Reconciliation Sublayer

Esta subcapa emula un medio de conexión punto a punto, con el objetivo de mantener compatibilidad con el estándar IEEE 802.3ah y dar la posibilidad de establecer futuras conexiones con otras redes de tecnología Ethernet. Este módulo es el responsable de recibir los mensajes del *UL* y dirigirlos hacia la instancia MPCP asociada a la ONU emisora. Si no existe instancia MPCP asociada a dicho nodo, esta se encarga de asignar la instancia libre inmediata a la dirección MAC de la ONU, de esta forma se establece conexión directa para futuras transmisiones.

■ DBA Agent

En este módulo reside el algoritmo de asignación de ancho de banda. La determinación del algoritmo DBA a implementar en el sistema de comunicaciones EPON es un aspecto que escapa de los estándares del IEEE 802.3ah y que permanece a libre escogencia del diseñador de la red. En el presente proyecto de investigación se implementaron dos (2) algoritmos, con el objeto de comparar sus

prestaciones en términos de las estadísticas estudiadas. El primero de ellos, conocido como algoritmo limitado propone una asignación de ventana máxima, y si la solicitud de transmisión es menor a este límite se otorga una ventana de este tamaño. El segundo algoritmo que se implementó es el conocido DDSPON propuesto por la Universidad Politécnica de Catalunya como una opción descentralizada, por lo cual, este módulo no representa el proceso encargado de distribuir el ancho de banda, sino más bien de centralizar las distribuciones que cada ONU haya determinado durante el ciclo. Es importante señalar que, cualquier operador que desee poner a prueba un nuevo algoritmo de asignación de ancho de banda, debe manipular únicamente los procesos asociados a este módulo, ya que involucra cualquier procedimiento asociado al DBA.

■ MPCP Clock

Este módulo representa el temporizador del OLT, cuenta en unidades de Time Quantum (TQ) donde un (1) TQ es equivalente a dieciséis (16) nanosegundos. Por otra parte, se encarga de interrumpir al *Discovery Gate Generation* de cada instancia indicando el tiempo de inicio de la ventana de descubrimiento.

4.3.3 Divisor y Combinador Óptico Pasivo

El divisor y combinador óptico representa el componente pasivo de la red. Este se encuentra en el camino de conexión entre la ONU y el OLT. En el canal de subida es el responsable de recibir los mensajes de las ONUs, unificarlos y enviarlos por el enlace al OLT. Mientras que en el canal de bajada es el responsable de recibir las tramas del puerto del OLT y enviarla a todos los puertos de salida conectados a las ONUs del sistema. El dispositivo óptico implementado en OPNET Modeler está formado por treinta y tres (33) receptores, treinta y tres (33) transmisores y dos (2) módulos, uno para cada canal. La figura 23 muestra a nivel del Editor de Nodos, la estructura en módulos del dispositivo óptico, pudiendo distinguir la configuración del combinador, asignada al canal de subida y la de divisor, asignada al canal de bajada.

El módulo asociado al divisor óptico tiene como función tomar el paquete emitido por el OLT, copiarlo y remitirlo a las N ONUs del sistema, independiente de la dirección MAC de destino, soportando así el principio de difusión *broadcast* de las redes de acceso EPON en su configuración punto a multipunto. Luego, la función del módulo asociado al combinador óptico es tomar los paquetes emitidos por las ONUs y remitirlos por un único canal hacia el OLT. Durante el modo de operación normal no habrá problemas de colisión debido a la implementación del protocolo MPCP, entendido como un mecanismo de control de transmisión para el uso del medio compartido. Sin embargo, durante el periodo de descubrimiento, dado el carácter aleatorio en la emisión de mensajes de solicitud de registro, este módulo es el encargado de detectar la colisión de *register request* y destruir estos paquetes.

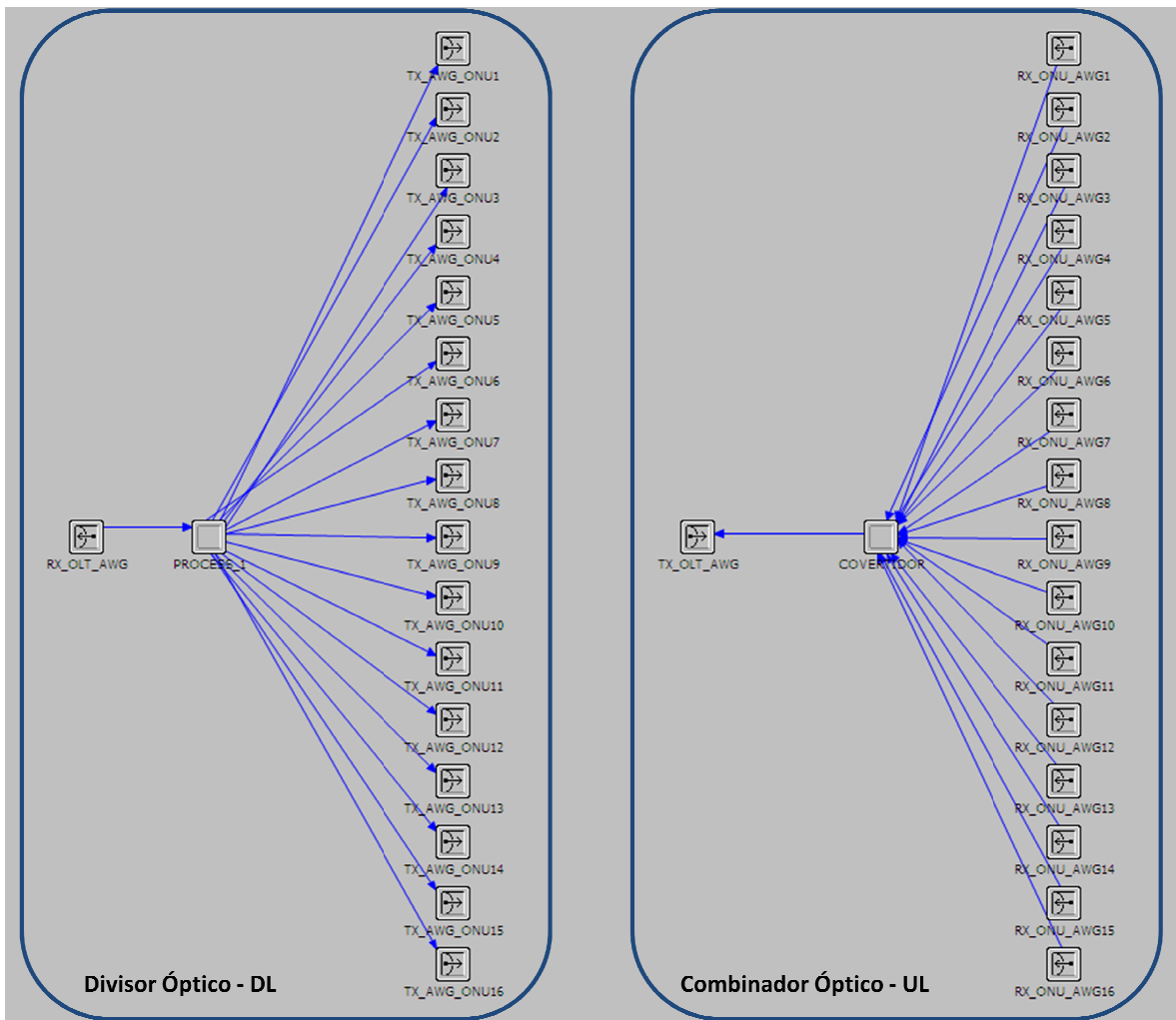


Figura 23: Modelo de Nodos del Dispositivo Óptico implementado en OPNET Modeler

Es importante señalar que, fue necesario aumentar la tasa de transmisión en el dispositivo óptico, con fines de evitar introducir al sistema un retardo adicional. El dispositivo óptico debe ser transparente entre la transmisión de la ONU y el OLT. Evidentemente el retardo adicional es proporcional al tamaño de la trama transmitida, para mitigar el efecto de este transmisor intermedio se aumentó la tasa de transmisión algunos órdenes superiores. Para determinar la tasa de transmisión eficaz de este transmisor se supuso el peor de los escenarios, es decir, un valor que elimine el efecto de la mayor transmisión posible, a tal efecto el valor de transmisión asignado fue $1e+25$ bits/segundo. Esta adaptación debió realizarse debido a las limitaciones que la herramienta de simulación impone para el modelo de un dispositivo pasivo.

El dispositivo óptico está diseñado de forma que el usuario pueda ajustar el número de elementos operativos, es decir, de la capacidad máxima de la red

(treinta y dos nodos), el operador puede seleccionar el número que desea simular activos para cada escenario. Para ello se debe ajustar el parámetro –Active Nodes- del menú de atributos del nodo en cuestión.

4.4 Consideraciones de la Implementación

El diseño e implementación del modelo de red EPON toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- El OLT es capaz de atender un máximo de treinta y dos (32) ONUs.
- El modelo inicial supone una cola por ONU, el diseño es extensible a varias colas por unidad.
- La duración de un ciclo, entendido como el periodo de tiempo en el cual transmiten N ONUs, con N el número de ONUs conectadas es un parámetro que puede ser ajustado por el usuario en los atributos del OLT.
- La distancia máxima entre ONU y OLT es de 20 kilómetros, lo que se traduce en un RTT máximo de 12500.
- El tiempo de guarda, entendido como el tiempo reservado entre ventanas de transmisión de distintas ONUs, es un valor que se fija por el usuario, el cual debe estar comprendido entre 0.5useg y 1useg (Ariel Maislos, 2002) [2].
- El tiempo entre ventanas de descubrimiento es un parámetro ajustable por el usuario, con el objeto de evaluar el mejor desempeño de la red con variaciones de esta medida.
- En el módulo *DBA Agent* del OLT reside el algoritmo de asignación de ancho de banda de canal. El algoritmo DBA es un aspecto que escapa de los estándares que rigen las redes de tecnología PON, por lo cual se consideró un diseño que proporcione libertad y facilidad al usuario para incorporar el algoritmo de su preferencia, con solo modificar el módulo asociado a este parámetro de simulación (DBA Agent).
- El modelo de Red EPON fue implementado con el algoritmo de asignación de ancho de banda de ventana fija. El tamaño de la ventana de transmisión que es otorgada a través de este algoritmo es un parámetro que el usuario puede ajustar en el módulo *DBA Agent* y que inicialmente está establecido en 3907 TQs, que es equivalente al máximo tamaño de ciclo (1 ms.) entre número total de ONUs conectadas ($N = 16$).
- Los mensajes de control *Report* son enviados al principio de la ventana de transmisión.
- La simulación de tráfico de red fue simulado a través de procesos auto-similares.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor por Defecto</i>	<i>Nodo-Módulo-Estado</i>	<i>Descripción</i>
Tciclo	1e-3	OLT – DBA Agent – Init	Valor de ciclo máximo expresado en [segundos].
Time_between_disc_window	0.018	OLT – DBA Agent – Init	Frecuencia de inicio de ventana de descubrimiento expresada en [segundos].
Disc_window_length	250	OLT – DBA Agent – Init	Longitud de la ventana de descubrimiento expresada en [TQs].
max_length	3907	OLT – DBA Agent – Init	Longitud máxima de ventana de transmisión fija del algoritmo DBA de ventana fija.
E	12500	OLT – DBA Agent – Init	Máximo RTT de la Red expresada en [TQs]. Este parámetro depende de la máxima distancia permisible. Para 32 ONUs esta distancia equivale a 20 Km y para 64 ONUs 10 Km.
MAC_ADDRESS	X	ONU	

Tabla 6: Parámetros Ajustables del Modelo de Red EPON desarrollado en OPNET Modeler.

CAPITULO V: DISEÑO E IMPLEMENTACION DE ALGORITMO DE ANCHO DE BANDA DDSPON: DISTRIBUTED DYNAMIC SCHEDULER FOR EPON, DESARROLLADO POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA.

5.1. Diseño Algoritmo de Asignación de ancho de banda DDSPON desarrollado por la Universidad Politécnica de Catalunya.

El modelo desarrollado para el sistema de comunicaciones estándar EPON basado en tecnología de acceso TDM, da la posibilidad al usuario de ajustar y/o modificar módulos específicos que determinen la operación del sistema, bajo un único algoritmo de distribución de ancho de banda determinado. Esta fase del proyecto, consistió en adaptar al modelo estándar de red EPON desarrollado, el algoritmo de distribución de ancho de banda DDSPON (De Andrade, Gutiérrez, & Sallent, 2007) [3]—del inglés: *Distributed Dynamic Scheduling for Passive Optical Networks*—, algoritmo de asignación inmediata, desarrollado por un grupo de investigación de la Universidad Politécnica de Catalunya.

En primer lugar, se debió trazar un esquema que describiera el funcionamiento del algoritmo DDSPON adaptado al modelo de Red desarrollado en el simulador de redes *OPNET Modeler*, es decir, describir a través de un diagrama de flujo el principio de operación del algoritmo, asociando cada función al módulo encargado de estos procedimientos -ver figuras 24 y 25-. Es importante señalar que dado el principio de operación de este algoritmo, los procesos asociados a la distribución dinámica del ancho de banda del canal se alojan en el *DBA Agent* de la ONU, contrario a los algoritmos centralizados cuyo esquema reside en el *DBA Agent* del OLT. En este caso, cada ONU determina la longitud de la ranura de transmisión, basada en una proporción del ciclo máximo y el OLT otorga la cantidad solicitada en un tiempo que determina disponible para evitar la colisión de datos sobre el medio compartido. En base a los esquemas de la figura 24 y 25 fueron modificados y adaptados tres (3) módulos del OLT y cuatro (4) módulos de la ONU, con el objetivo de implementar el algoritmo de distribución de ancho de banda DDSPON sobre el modelo de red estándar. En la tabla 7 se enumeran los módulos reprogramados para la implementación del algoritmo DBA, junto a una breve descripción de las nuevas funciones que desempeñan. En el anexo A se presentan los códigos de programación de cada módulo, para el logro de las funciones descritas en esta sección.

<i>Nodo</i>	<i>Modulo</i>	<i>Descripción de nuevas funciones</i>
OLT	DBA Agent	Otorgar una ventana de transmisión cuya longitud es la solicitada en el mensaje de control Report.
OLT	Report Reception	Actualizar vector de pesos en base a la información enviada por la ONU. Determinar el fin de ciclo de cada instancia MPCP, e invocar al DBA Agent para solicitar la generación de un mensaje de control Gate.
OLT	Gate Generation	En la generación del mensaje de control Gate se envía el vector de pesos actualizado para el nuevo ciclo de cada ONU.
ONU	DBA Agent	Determinar en base al algoritmo DDSPON la longitud de la ranura de transmisión a solicitar.
ONU	q_1_discovery	Ajustar solicitud de la ONU a un valor que garantice el envío de un número exacto de paquetes sin desperdicio de tiempo de transmisión.
ONU ONU	Gate Reception Report Process	Asignar a registros el vector de pesos actualizado. Enviar cálculo de nuevo peso asociado a la ONU en un campo reservado del mensaje de control Report.

Tabla 7: Módulos modificados para ajuste de Algoritmo DBA DDSPON

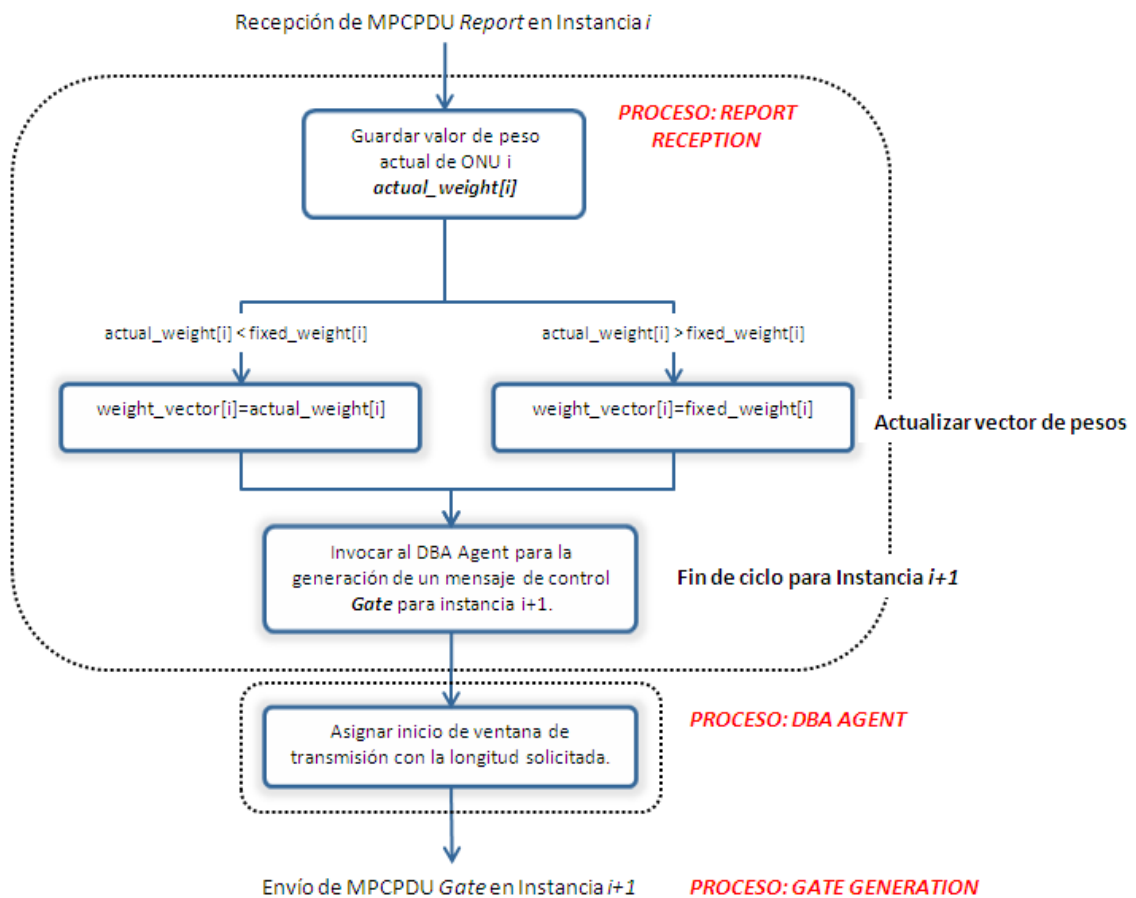


Figura 24: Diagrama de Flujo de Operación de Algoritmo DDSPON en el OLT

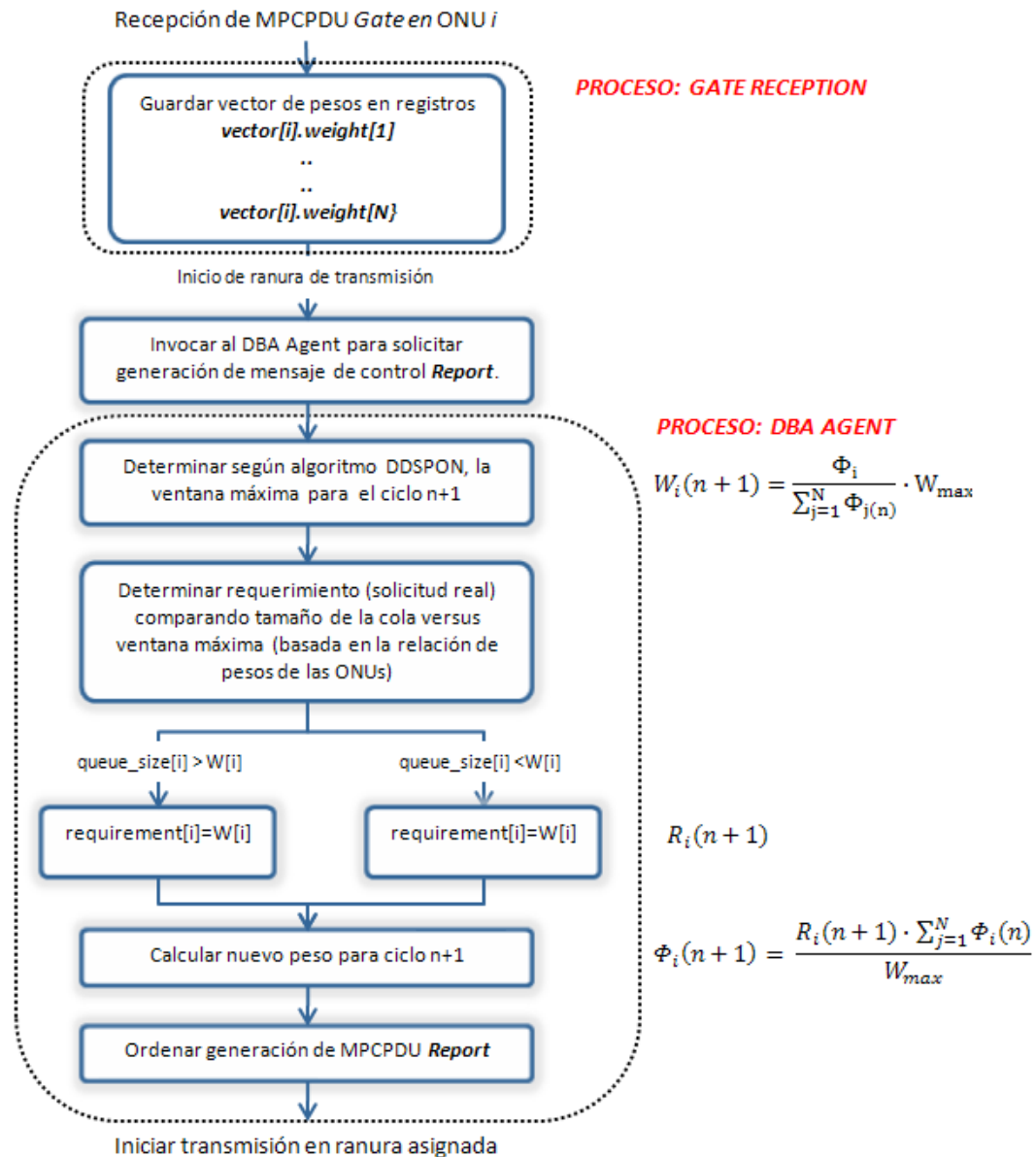


Figura 25: Diagrama de Flujo de Operación de Algoritmo DDSPON en la ONU

La figura 26 muestra un esquema en tiempo del procedimiento de asignación de ancho de banda llevado a cabo por el esquema DDSPON en la implementación desarrollada.

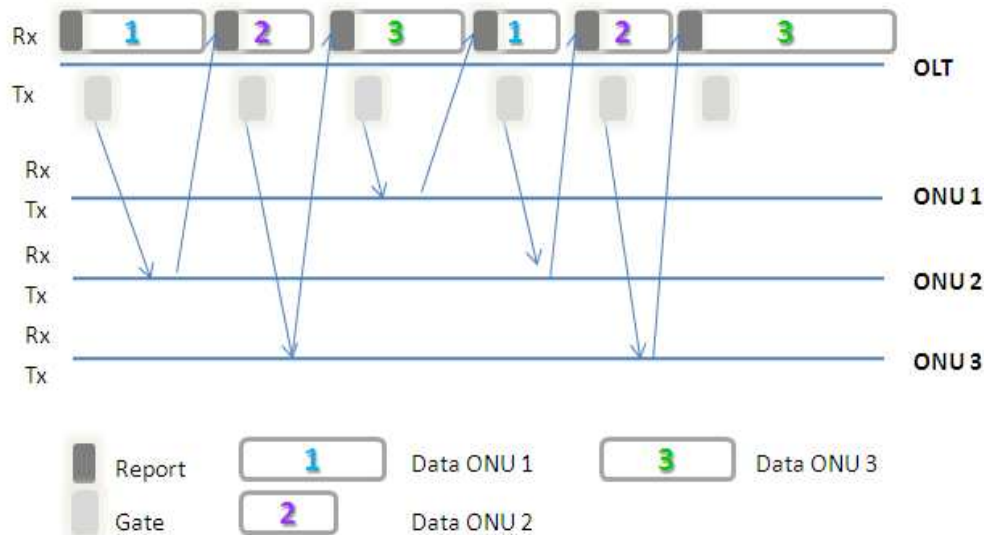


Figura 26: Esquema en tiempo del algoritmo de asignación de ancho de banda DDSPON para un caso de tres ONUs

5.2. Consideraciones de Diseño e Implementación del algoritmo de asignación de ancho de banda DDSPON.

A continuación se enumeran las consideraciones de diseño de la red de acceso de nueva generación EPON con tecnología de acceso TDM y algoritmo de asignación de ancho de banda DDSPON:

- En el punto inicial de operación el peso ϕ_i de una ONU es equivalente al peso nominal ϕ_{nominal} .
- El peso nominal ϕ_{nominal} de cada ONU del sistema, es equivalente al valor del ciclo máximo W_{max} entre el número total de ONUs N , es decir, todas las ONUs tienen la misma proporción de transmisión. Si el usuario desea implementar un escenario con distintos requerimientos de red para cada cliente, deberá configurar en el estado INIT del *DBA Agent* del OLT el arreglo `fixed_weight[i]`, con i el número de la ONU.
- El parámetro asociado al tamaño del ciclo máximo W_{max} utilizado en el cálculo de la ventana de transmisión instantánea, puede ser ajustado por el usuario de acuerdo al escenario de simulación. Para ajustar esta variable, el usuario puede modificar su valor en el estado INIT del *DBA Agent* de la ONU.
- Se incorporó al diseño una rutina de verificación que ajuste el requerimiento de transmisión a un valor ajustado al estado real de ocupación de la cola, en otras palabras, el diseño garantiza en 100% la utilización de la ranura de transmisión.

CAPITULO VI: DISEÑO E IMPLEMENTACION DE RED DE ACCESO EPON CON TECNOLOGÍA DE ACCESO WDM

6.1. Diseño Red EPON con tecnología de acceso WDM.

La implementación de la red de nueva generación EPON con tecnología de acceso WDM se hizo sobre las bases del modelo desarrollado para la red EPON con tecnología de acceso TDM, a partir del ajuste de los procesos afectados para la transmisión multicanal. La extensión del modelo original a tecnología WDM implicó sutiles cambios en la programación original, que suponen la planificación de varios canales.

En el proceso planificador *DBA Agent* del OLT del modelo original, se creó una variable de estado $T_{\text{scheduled}}$ que indica el tiempo en unidades de TQs hasta donde ha sido planificado el canal de subida para la transmisión de las ONUs del sistema, ahora para el caso multicanal de la tecnología WDM, esta variable se convirtió en un arreglo con tamaño igual al número de longitudes de onda disponibles, que indican la planificación de tiempo de cada canal de longitud de onda diferente. El nuevo código de programación del proceso planificador del OLT (*DBA Agent*) luego de la solicitud de una ranura de transmisión por parte de alguna ONU del sistema, revisa en una ronda round-robin los tiempos planificados de cada canal de longitud de onda $T_{\text{scheduled}}$, planificando la transmisión de la ONU sobre la longitud de onda con menor planificación a futuro, distribuyendo las transmisiones equitativamente sobre cada canal. Es importante señalar que, la extensión del protocolo MPCP para el diseño de la red de acceso con tecnología WDM supone incorporar en uno de los campos reservados del mensaje de control *Gate* la longitud de onda sobre la cual debe transmitir de modo que la ONU sintonice su transmisor a esa longitud de onda. Las limitaciones del simulador de redes OPNET Modeler para el modelado de sistemas de comunicaciones con tecnología óptica fue solventado mediante el uso de streams multicanales, donde cada canal representa una longitud de onda diferente.

6.2. Consideraciones de Diseño e Implementación de la red de nueva generación EPON con tecnología de acceso WDM EPON.

- Canal de bajada con tecnología de acceso TDM de canal simple.
- Canal de subida con tecnología de acceso TDM-WDM, es decir, cada longitud de onda es compartida por varias unidades de la red. Esto significa que el número de longitudes de onda disponibles será siempre menor al número de ONUs activas de la red.

- Las ventanas de transmisión son asignadas por el proceso *DBA Agent* del OLT bajo un mecanismo round-robin.
- Cada ONU dispone de transmisores sintonizables capaces de transmitir a la longitud de onda asignada por el OLT.

CAPITULO VII: PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

7.1. Resultados de Simulaciones sobre el Sistema de Red de nueva generación EPON.

El proceso de simulación y prueba de la red se dividió en varias fases, con la finalidad de facilitar la detección de errores de implementación y garantizar la funcionalidad del sistema de comunicaciones. En primer lugar, se hicieron pruebas de simulación aisladas de cada uno de los componentes del sistema, con el objetivo de validar el modelo propuesto. Posteriormente, se realizaron pruebas sobre el modelo de red, entendida como la integración de estos componentes en un único entorno de simulación. En el presente capítulo se expondrán los resultados obtenidos para la implementación de la red EPON con tecnología de acceso TDM y algoritmo de distribución de ancho de banda de ventana fija. La sección **7.1.1. y 7.1.2** reúne los resultados de simulación que derivan del estudio operativo del sistema de comunicaciones, es decir, la recolección de estadísticas que permitieron validar el modelo en sus modos de operación normal y de descubrimiento. La sección **7.1.3.** presenta resultados empíricos que revelan el comportamiento de la red para variaciones de carga de la red y permitieron concluir en torno a las prestaciones del sistema, dadas las características del entorno de simulación.

7.1.1. Estudio de operación del modelo de red EPON con tecnología de acceso TDM y algoritmo de asignación de ancho de banda de ventana fija.

Posterior a la evaluación y validación individual de cada componente de la red, se realizaron pruebas de simulación sobre el sistema de red EPON, entendido como la integración de estos elementos en la configuración de red inicialmente planteada, con el fin de validar el modelo base de red. La importancia de documentar y justificar la validación del modelo de red, radica en el hecho de que este representa las bases del proyecto, es decir, sobre este modelo se realizó la implementación de nuevos algoritmos DBA y extensión a la tecnología de acceso WDM.

Para facilitar el proceso de simulación, éste se realizó en varios escenarios. El primero de estos escenarios consistió en llevar a cabo pruebas sobre un sistema EPON en sus dos (2) modos de operación: descubrimiento y normal, limitado a un total de tres (3) ONUs inicialmente desregistradas. Se planificó la simulación de un primer escenario con un número reducido de ONUs, considerando que tal configuración permitiría detectar con mayor facilidad errores asociados a la interconexión e interacción de los elementos en un mismo nivel. Considerando que este escenario de simulación pretende desde un nivel mucho

más sencillo disponer de conocimientos y pruebas para escenarios más complejos que definan la red a implementar, no se expondrán estos resultados parciales y se describe el escenario de mayor complejidad.

El segundo escenario de simulación consistió en incorporar al sistema, un total de dieciséis (16) ONUs y un OLT con dieciséis (16) instancias MPCP. Con el fin de comprobar la validez de ciertos cálculos propios del protocolo de acceso, se consideró despreciable el retardo basado en distancia del enlace, de esta forma, conocido el valor esperado cuando la distancia entre ambos nodos es nula se podrá determinar la validez del parámetro, de lo contrario, verificar que estos valores eran correctos con distancias incorporadas al sistema habría sido una labor complicada.

El tercer y último escenario de simulación consistió en validar el modelo de red en su versión más completa y definitiva. Las condiciones de simulación de este escenario se enumeran a continuación:

- Número total de ONUs conectadas a la red: dieciséis (16) unidades.
- Número de Instancias MPCP activas del OLT: dieciséis (16) unidades.
- Velocidad de transmisión del enlace: 1 GBPS.
- Distancia máxima entre ONU y OLT: 20 km.
- Retardo de enlace basado en la distancia. Esto influye de forma directa en el cálculo de RTT, para todas las ONUs de la red.
- Tamaño de Ventana Fija máxima para algoritmo de asignación de ancho de banda de 3907 TQ, que es equivalente al máximo ciclo 1 mseg (62500 TQ) entre el número total de ONUS.
- Ventana de descubrimiento de longitud 150 TQs.
- El tiempo entre ventanas de descubrimiento es de 0.018 segundos.
- Tiempo de Guarda entre ranuras de transmisión de diferentes ONUs 500 TQs.
- Todas las ONUs desean registrarse a la red, desde el tiempo inicial de simulación.

En el proceso de la figura 27, se ilustra el funcionamiento del sistema de comunicaciones en sus dos (2) modos de operación. Como se observa, el proceso se inicia con el envío de un mensaje de control *Discovery Gate*, que da oportunidad a las ONUs inicialmente desregistradas, de solicitar ser registradas a la red. En función de las ONUs que logren ser registradas, se inicia el proceso de asignación de ancho de banda de transmisión, para controlar el tráfico en el canal de subida a partir del mecanismo de control MPCP. Cada 0.018 segundos se inicia una nueva ventana de descubrimiento que brinda la oportunidad a aquellas ONUs que no alcanzaron registrarse durante la primera ventana, de intentar nuevamente. En la línea de tiempo –ver figura 27–, la ONU 1 simula uno de los nodos que logra registrarse a la red durante la primera ventana de descubrimiento, mientras que la ONU N representa una de las ONUs que aunque transmite su mensaje de solicitud

de registro, este colisiona con lo cual no logra registrarse en este primer intento de conexión.

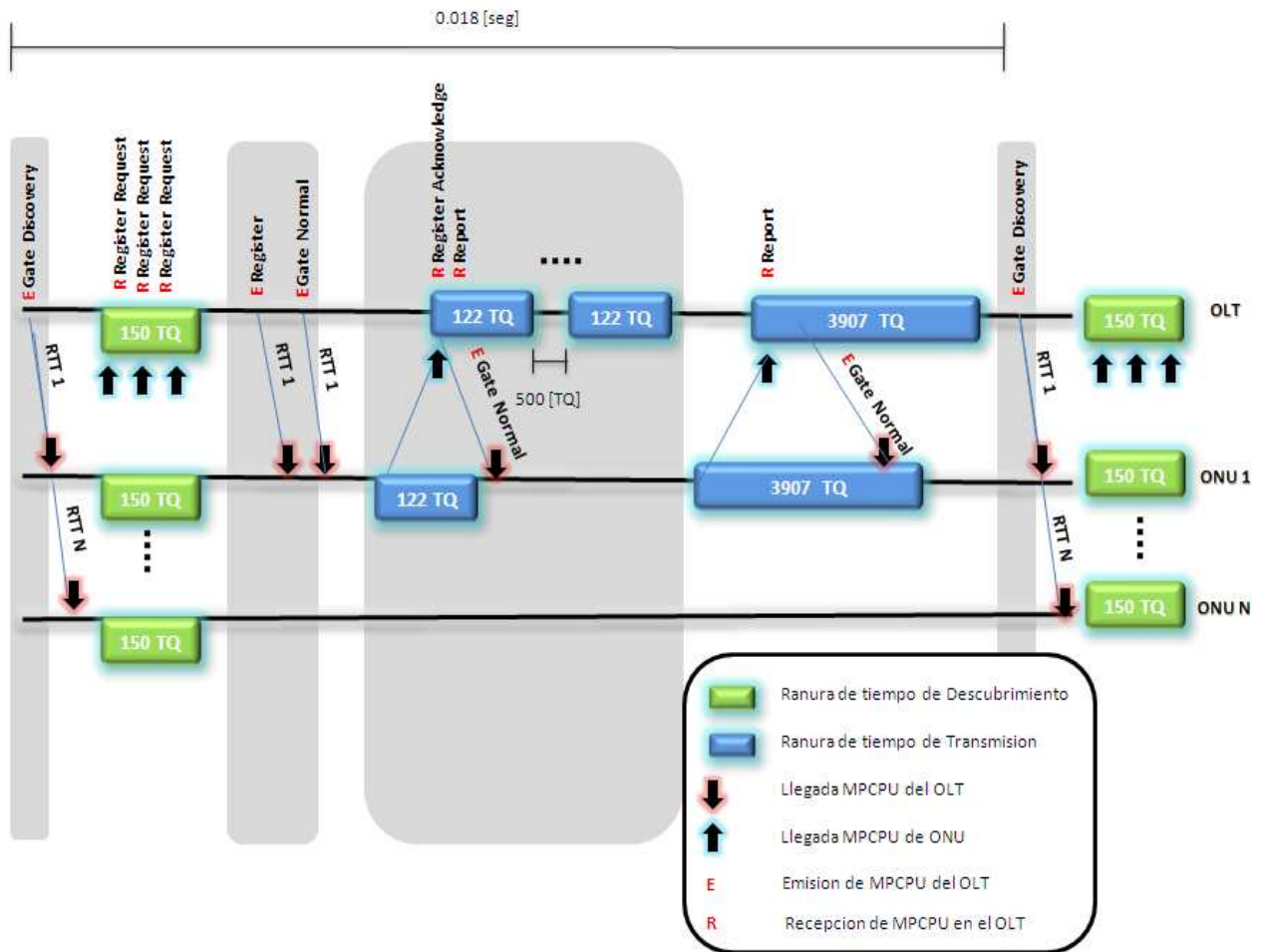


Figura 27: Línea de Tiempo de Escenario de Simulación de Red EPON con Tecnología TDM y algoritmo DBA de ventana fija.

Los resultados de este escenario de simulación fueron los siguientes:

- En el modo de descubrimiento, las ONUs se registran a la red en el orden descrito en la tabla 8. La figura 28 presenta la recolección de estadísticas en el proceso *Discovery Agent* del OLT, que permiten detectar el inicio de una ventana de descubrimiento y la llegada de mensajes de solicitud de registro por ventana. Durante la primera ventana de transmisión alcanzaron registrarse tres (3) ONUs, el resto de los mensajes de solicitud de registro colisionaron en el canal, por lo cual no se inició el proceso de descubrimiento para estas unidades. La colisión de los mensajes de solicitud de registro de las trece (13) ONUs restantes obedece al tamaño de la ventana de descubrimiento, siendo la ventana tan pequeña, todos intentan enviar sus mensajes en tiempos aleatorios muy cercanos, que provocan la colisión de los paquetes en el canal de subida. De forma similar, continúa el proceso de registro durante las

siguientes ventanas de descubrimiento. El total de ONUs del sistema se encuentran registradas para el final de la séptima ventana de descubrimiento. El orden de registro de las ONUs así como la cantidad que se registra por ventana, es un aspecto que depende del tamaño de la ventana de transmisión y de la aleatoriedad de transmisión de cada nodo. Se realizaron varias pruebas de simulación alimentando el proceso de simulación con distintas semillas, verificando que la aleatoriedad en el envío de mensajes de control *Register Request*, determina el comportamiento de la red durante el periodo de descubrimiento.

# Ventana de Descubrimiento	Número de ONUs registradas exitosamente
1	3
2	3
3	3
4	3
5	2
6	1
7	1
8	-
9	-
Total ONUs	16

Tabla 8: Registro de ONUs - Escenario de Simulación Red TDM-EPON con DBA de ventana fija

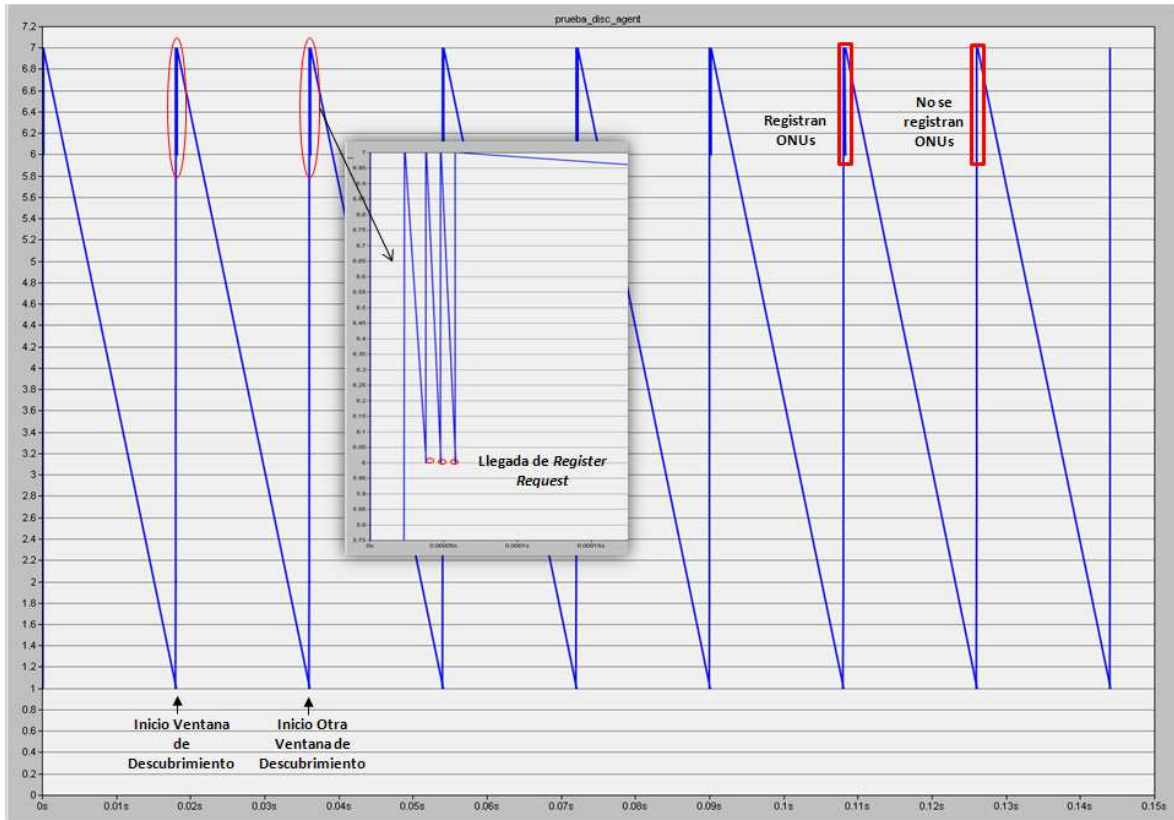


Figura 28: Proceso Discovery Agent del OLT para Escenario de Simulación TDM-EPON con DBA de ventana fija.

- (b) La recolección de estadísticas en el proceso *Report Reception* del OLT arrojó información importante sobre la operación del protocolo MPCP en el arbitraje de uso del canal –ver figura 29-. Se hizo la recolección de estadísticas para las instancias registradas durante la primera ventana de descubrimiento. Esta gráfica indica la recepción de mensajes de control *Report* para cada instancia MPCP del OLT. Es posible observar que la frecuencia de recepción de *Reports* varía al final de cada ventana de descubrimiento, ello obedece al hecho de que al incorporarse nuevas ONUs al sistema, las ONUs registradas previamente deberán compartir el canal con otras ONUs, con lo cual la frecuencia de transmisión disminuirá al aumentarse en proporción directa al número de ONUs recientemente registradas el ciclo (T_{ciclo}) para cada nodo.

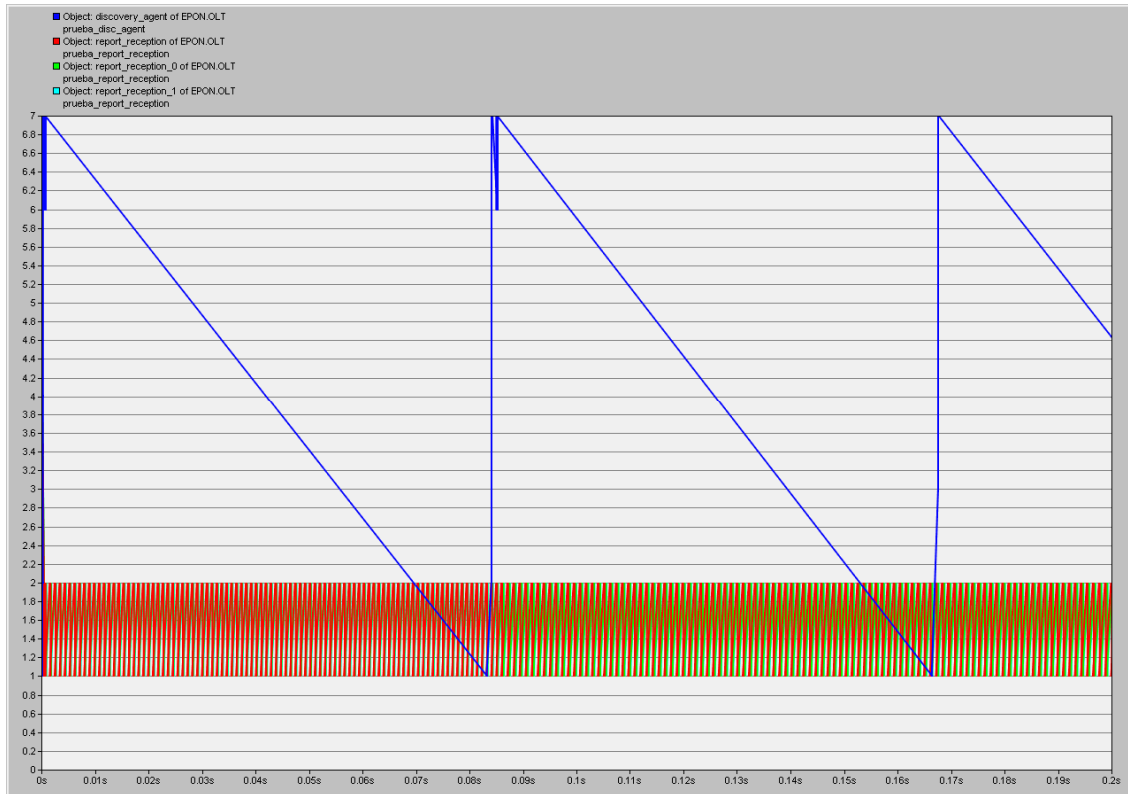


Figura 29: Proceso Report Reception superpuesta con Proceso Discovery Agent.

- (c) La figura 30 muestra el uso del canal de subida compartido entre todas las ONUs de la red. Esta gráfica resulta de la recolección de estadísticas del módulo *Control Multiplexer*, módulo asociado a la transmisión de cada ONU. Las gráficas de todos los módulos superpuestas dan idea en tiempo del uso del canal. De la gráfica es posible concluir que el tamaño del ciclo varía con el registro de nuevas ONUs a la red, el ciclo máximo es igual al número máximo de ONUs conectadas, $N=16$ por el tamaño de la ventana fija. El desperdicio de ancho de banda se hace evidente, ya que en algunos casos la longitud de la ventana de transmisión excede los requerimientos de la ONU, observando espacios sin transmisión durante el tiempo activo de cada unidad.

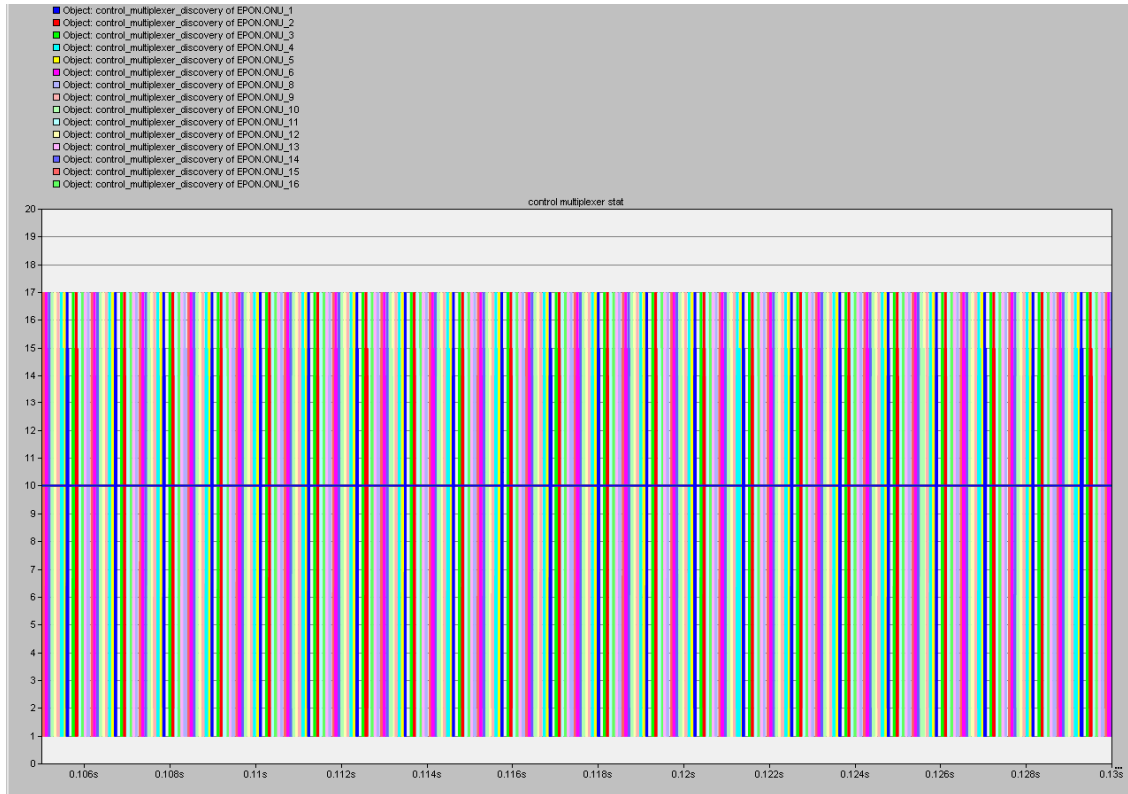


Figura 30: Control Multiplexer, Proceso Transmisor de las ONUs

- (d) Para determinar la eficiencia del algoritmo de asignación de ancho de banda de ventana fija, se realizó una gráfica de la ocupación real de la cola de la ONU –ver figura 31-. La línea constante representa el tamaño fijo de la ventana otorgada para transmisión. Es posible determinar que el algoritmo de asignación de ancho de banda tiene importantes limitaciones, en cuanto no se ajusta a las necesidades reales de transmisión de cada ONU, provocando desperdicio de ancho de banda para el caso de ONUs con menor ocupación de sus colas, pudiendo ser otorgado este tiempo a aquellas unidades que tienen mayores requerimientos para un mismo ciclo.

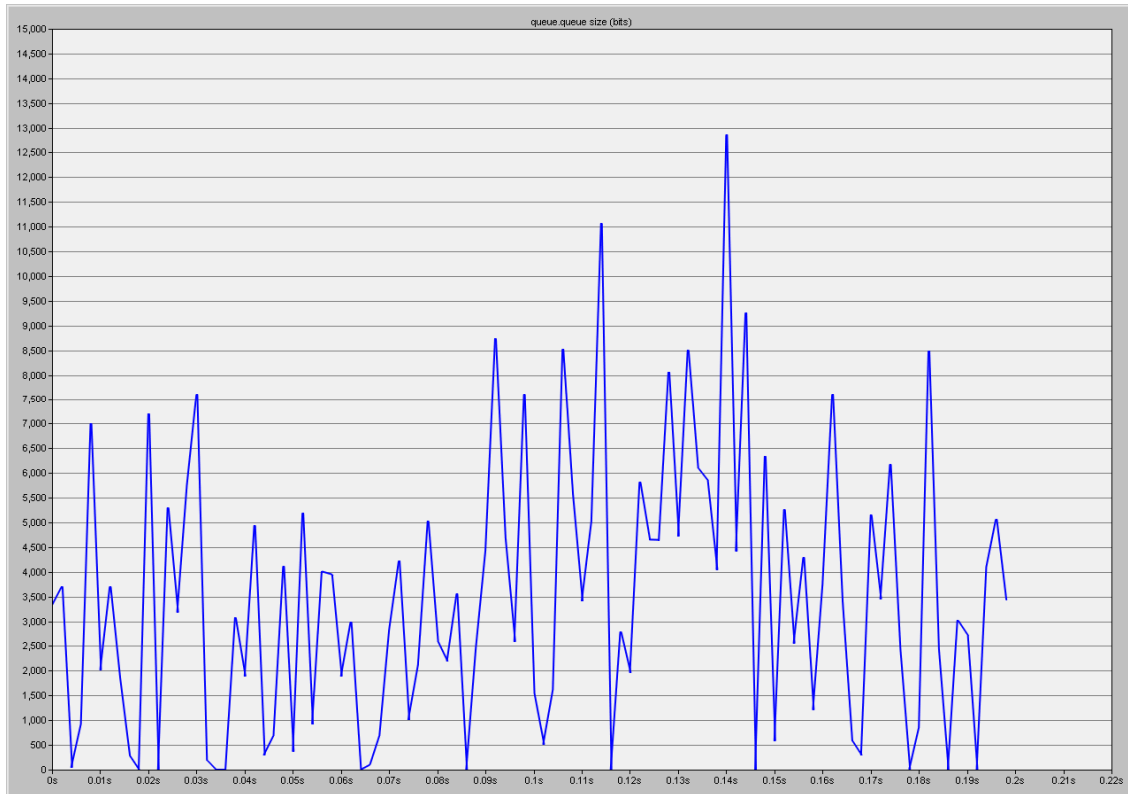


Figura 31: Requerimiento de las ONUs

- (e) Es importante señalar que se hizo la recolección, seguimiento e interpretación de múltiples variables, registros y estados adicionales, que no pueden ser recogidos en este capítulo, debido a la extensión de los mismos, sin embargo, su importancia radica en la verificación del modelo desde una perspectiva detallada de operación.

7.1.1. Estudio de operación del algoritmo de asignación de ancho de banda *DDSPON*.

Posterior a la implementación del modelo de red EPON con tecnología de acceso TDM y algoritmo de asignación de ancho de banda *DDSPON*, se realizaron pruebas de simulación con el objetivo de estudiar el comportamiento de los sistemas de comunicación bajo distintas condiciones de operación. En esta sección se presentan los resultados asociados a la recolección de estadísticas, que permitieron verificar la funcionalidad del algoritmo, es decir, el estudio de estadísticas que garantizaron la operación del sistema bajo las premisas teóricas

que definen al esquema de asignación de ancho de banda DDSPON (De Andrade, Gutiérrez, & Sallent, 2007) [3], permitiendo la validación del modelo implementado.

Una de las modificaciones esenciales que inserta la implementación de este algoritmo al modelo de red base, es el momento de generación de mensajes de control Gate, mensajes que informan a la ONU el tiempo de inicio de la ventana de transmisión y longitud de la misma. Para el esquema de asignación fijo, se consideró que a la llegada de un *Report*, se ordena la generación de un gate para esa instancia MPCP. Por otro lado, el algoritmo DDSPON debe retrasar el envío y generación del mensaje de control Gate con el fin de actualizar el vector de pesos de todo el ciclo, antes de enviarlo a la ONU. La limitante de este procedimiento, se puede reflejar en el siguiente ejemplo, si el OLT recibe un mensaje de control Report de la ONU i con ventana de transmisión corta. el envío del mensaje gate a la ONU $i+1$, suponiendo que tiene un RTT grande, implicará un desperdicio de ancho de banda en el proceso de planificación del UL. La figura 32 muestra la verificación de envío y recepción de mensajes de control para el caso de tres (3) ONUs, por ejemplo, cuando la instancia 3 recibe un report, se envía un gate a la instancia 1, cuando se recibe el report de la instancia 1 se actualiza el vector de pesos y se envía un gate a la instancia 2 y así sucesivamente.

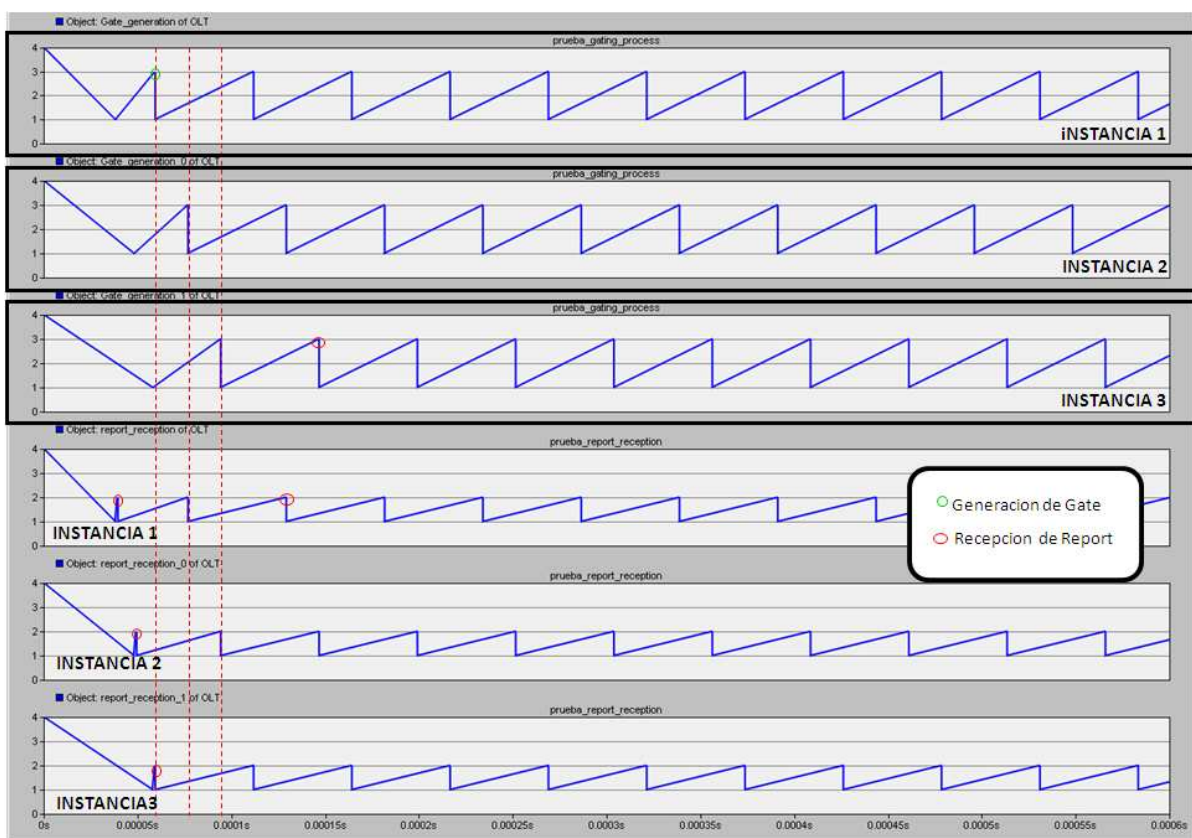


Figura 32: Recepción y Generación de Mensajes de Control para tres (3) Instancias MPCP en modelo de algoritmo DDSPON. Tasa de Generación de Tráfico self-similar: 100 pk/seg. H = 0.8

Otra gráfica que revela un comportamiento interesante del modelo desarrollado, es la presentada en la figura 33. Esta muestra solapadas el inicio de una ventana de descubrimiento, reflejada en la transición máxima de la traza azul de 0 a 7 y el proceso de recepción de mensajes de control Report para las tres primeras instancias del OLT. Durante el primer periodo (antes de la segunda ventana de descubrimiento) la periodicidad de mensajes de control obedece a que solo 3 ONUs están registradas. Luego de la segunda ventana de descubrimiento 6 ONUs están registradas a la red, la distancia entre la llegada de reports se debe a la acumulación de paquetes en la cola de las ONUs recién registradas, una vez que se libera el flujo de paquetes en cola la periodicidad aumenta de nuevo, ya que en condiciones de tráfico bajas los requerimientos de transmisión son cortos.

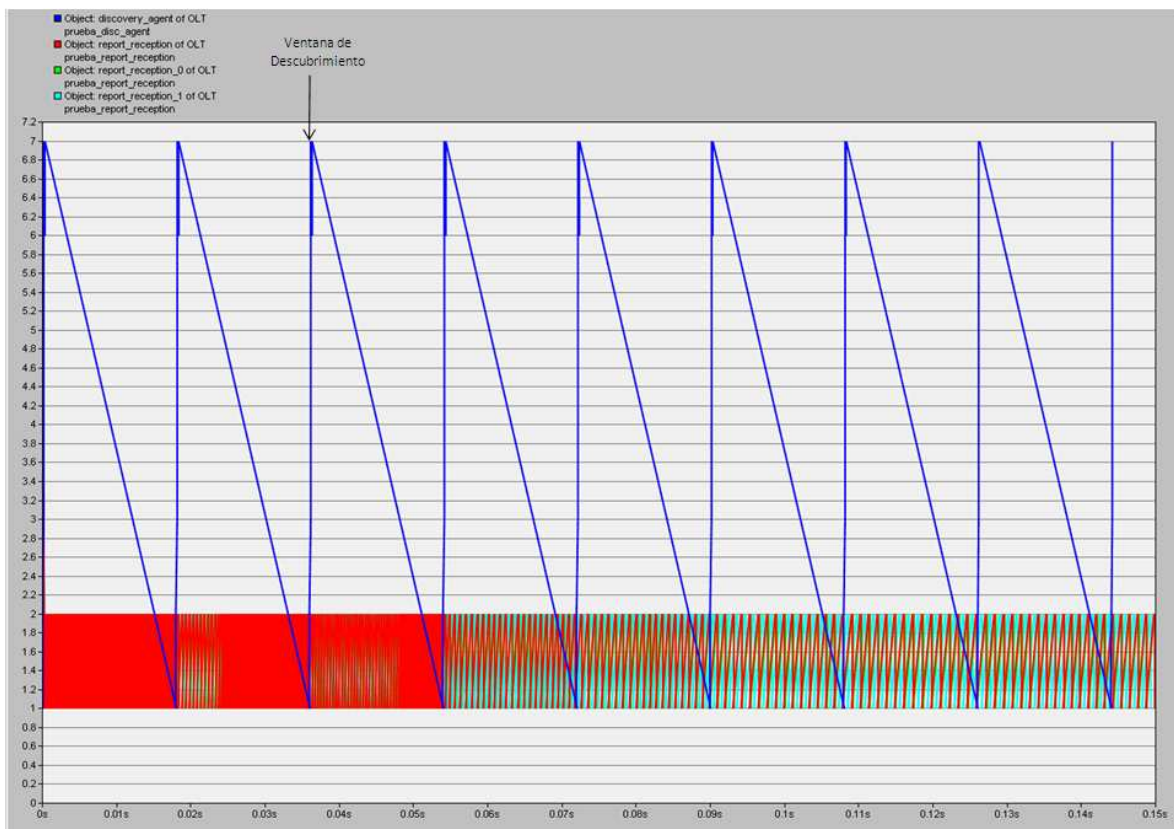


Figura 33: Recepción de Mensajes de Control *Report* como función del tiempo para las 3 primeras instancias del OLT en modelo de Red TDM-EPON con DBA DDSPON. Tasa de Generación de Tráfico self-similar: 100 pk/seg. $H = 0.8$

7.1.2. Estudio de prestaciones de red EPON con tecnología de acceso TDM y algoritmo de asignación de ancho de banda de ventana fija versus algoritmo de asignación dinámica de ancho de banda DDSPON.

Para evaluar las prestaciones del sistema de comunicaciones, se estudiaron algunos de los parámetros estándar en la verificación del comportamiento de redes. Los parámetros seleccionados para el estudio fueron: throughput, retardo de colas, tamaño de colas, utilización del canal y retardo end-to-end. Cada uno de estos parámetros se evaluó para distintos valores de carga de red, luego, los valores medios obtenidos para cada escenario se graficaron pudiendo estudiar estas variables como una función de la carga del sistema.

A continuación se presenta una tabla que muestra los valores de carga utilizados para cada escenario de simulación. Es importante señalar que para estos cálculos se consideró distribuir la carga total de la red de forma equitativa entre las N ONUs del sistema.

# ESCENARIO	TASA DE GENERACION DE TRAFICO [paquetes/seg]	CARGA DE LA RED[%]
1	494	5
2	988	10
3	1482	15
4	1975	20
5	2470	25
6	2963	30
7	3457	35
8	3951	40
9	4445	45
10	4938	50
11	5432	55
12	5926	60
13	6420	65
14	6914	70
15	7407	75
16	7901	80
17	8395	85
18	8889	90
19	9383	95
20	9877	100

Tabla 9: Valores de Carga de la Red para escenarios de simulación

La tasa de generación de tráfico señalada en la tabla 9 es un parámetro que se ajusta en el módulo RPG –del inglés: *Raw Packet Generator*- de OPNET Modeler.

En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos para el sistema de red EPON con tecnología de acceso TDM y algoritmo de asignación de ancho de banda de ventana fija. En las figuras 34,35,36,37, se presentan los parámetros evaluados para este escenario: tamaño promedio de la cola, retardo end-to-end, retardo medio de paquetes y throughput, como función de la carga de la red. En la figura 34 se observa que el tamaño medio de la cola en la ONU experimenta cambios abruptos para cargas de red superiores a 0.65, es decir, que para altos niveles de tráfico de red, el tamaño promedio de la cola aumenta progresivamente, alcanzando para el 100% de capacidad de la red, un valor medio de 439310 bytes, lo cual, tiene implicaciones sobre el tamaño máximo del buffer, con fines de evitar la pérdida de información. La figura 35 muestra que el incremento del tamaño medio de la cola, se traduce también en mayor retardo medio de paquetes, referida a mediciones sobre el tiempo que permanece un paquete en la cola, esto significa que la longitud fija de la ventana de transmisión es insuficiente para responder al estado de ocupación de la cola, cola que crece a razón de las características de tráfico auto-similar. La figura 36 muestra un comportamiento similar al experimentado por los parámetros anteriormente evaluados, donde el valor de retardo end to end, cambia de forma abrupta para condiciones de tráfico superiores al 65% de la capacidad total del sistema, este comportamiento era esperado en base a los resultados de la gráfica 35, ya que al permanecer en promedio más tiempo en cola antes de ser transmitido por la red, aumenta el retardo asociado al tiempo entre que fue recibido el paquete de los usuarios y llega al destinatario final. Con el fin de justificar de forma objetiva el comportamiento de la red para condiciones de alto tráfico, se comparó el estado real de ocupación de las colas, es decir, la solicitud media de transmisión de las ONUs versus el valor medio de ventana otorgada, valor que para este caso es constante, ya que independiente de los requerimientos el tamaño de la ventana es fija. De la figura 37 se observa que la solicitud promedio de transmisión de las ONUs para cargas de red inferiores al 65% no supera el tamaño fijo de la ventana asignada, con lo cual en el peor de los escenarios se estará desaprovechando ancho de banda al haber un remanente de la ranura y en el mejor de los casos actuará como un algoritmo predictivo permitiendo el envío de paquetes que hayan llegado a la ONU durante el tiempo de asignación de transmisión. Por otro lado, a partir de porcentajes de carga de red superiores al 65% de la capacidad total del sistema (observar cruce de ambas líneas en *figura 37*), la ONU solicita transmitir mucho más de la capacidad de transmisión por ventana, esto genera la acumulación de paquetes en la cola, lo que provoca el aumento del tamaño promedio de la cola y del tiempo promedio de permanencia de paquetes en la misma.

Finalmente, la figura 38 revela el throughput del sistema como función de la carga de la red. De acuerdo a las justificaciones previas, este comportamiento era esperado, es decir, para escenarios donde la carga de red es inferior a 0.65, el

tamaño promedio de las colas siempre es inferior a la ventana de transmisión asignada y aumenta para cada porcentaje de carga, con lo cual se espera que aumente el número de paquetes por unidad de tiempo (throughput), ello porque hay más paquetes en cola para llenar el espacio vacío de la ventana, que era un remanente del caso anterior (desperdicio de ancho de banda). Para casos mayores a 0.65 el valor del throughput tiende a estabilizarse, ya que se encuentra operando a su máxima capacidad de entrega, limitado por la ventana otorgada, es decir, la solicitud de transmisión supera la longitud de ventana asignada con lo cual tenderán a transmitir en toda la ranura, dejando remanentes en el caso de que no entre un paquete, ya que este no puede ser fragmentado. Este resultado se observa de forma más clara en la gráfica de utilización de ancho de banda –ver figura 39- como una medida del uso del canal, un valor del 100% indica uso completo del canal. La dispersión alrededor de los valores del throughput da un mayor rango de validez a los resultados expuestos con caracterizaciones de desviación estándar entre el 2 y 9%.

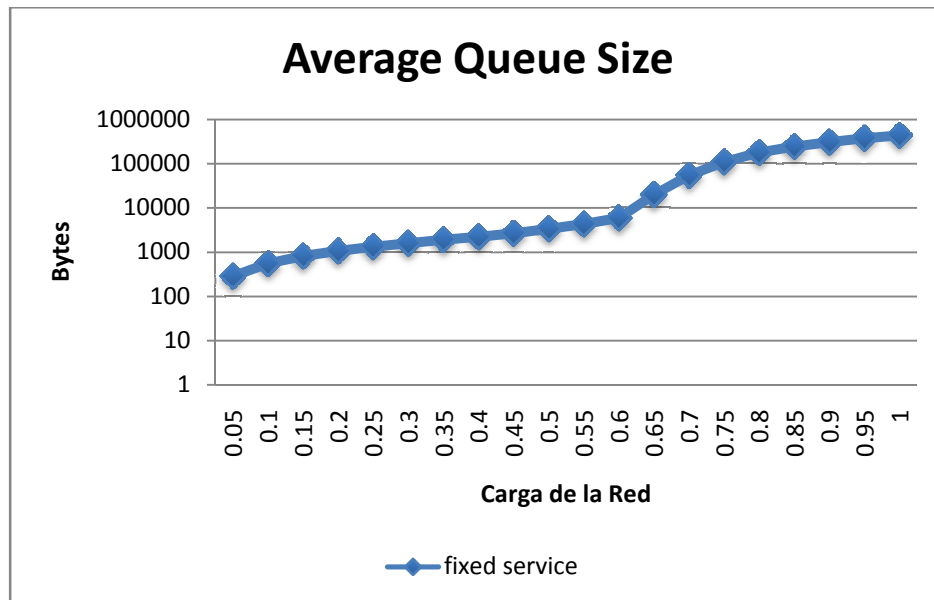


Figura 34: Tamaño Medio de la cola vs. Carga de la Red para TDM-EPON con DBA fijo.

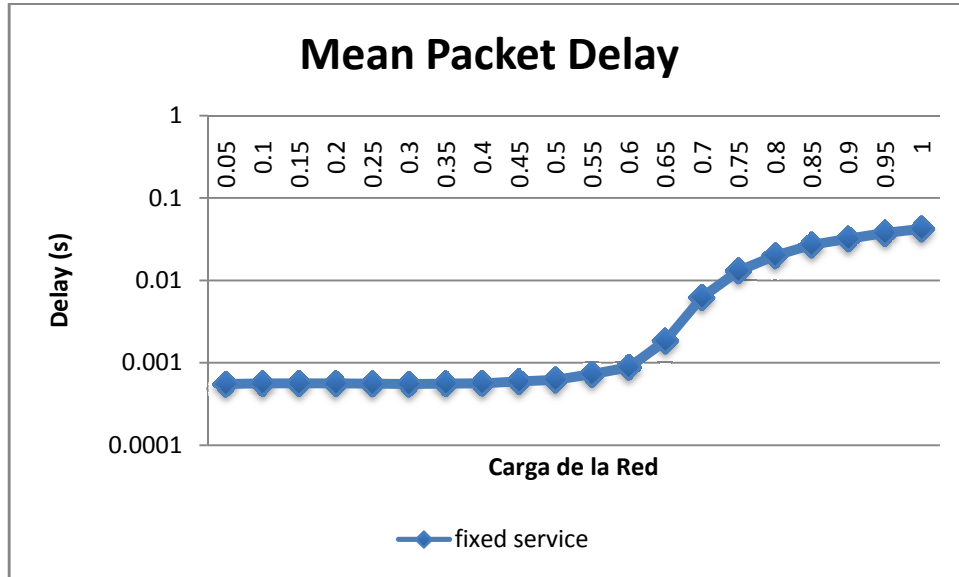


Figura 35: Retardo Medio de Paquetes vs. Carga de la Red para TDM-EPON con DBA fijo.

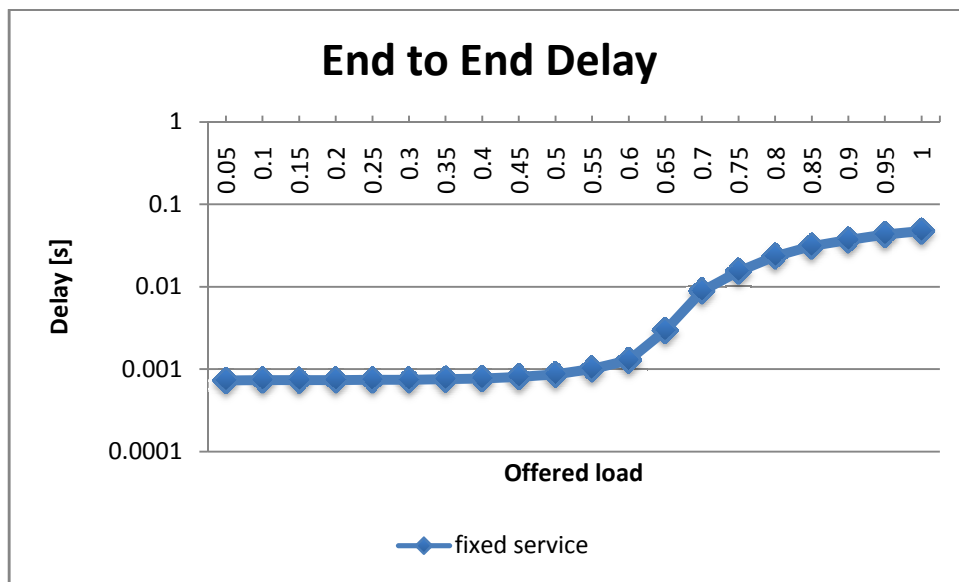


Figura 36: Retardo End to End vs. Carga de la Red para TDM-EPON con DBA fijo.

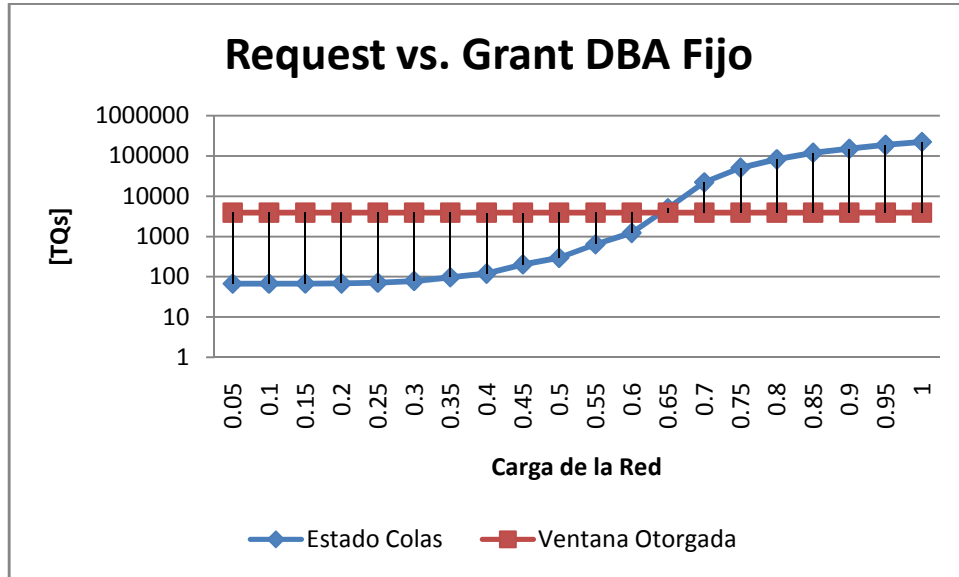


Figura 37: Solicitud de Transmisión vs. Asignación de Transmisión para TDM-EPON con DBA Fijo.

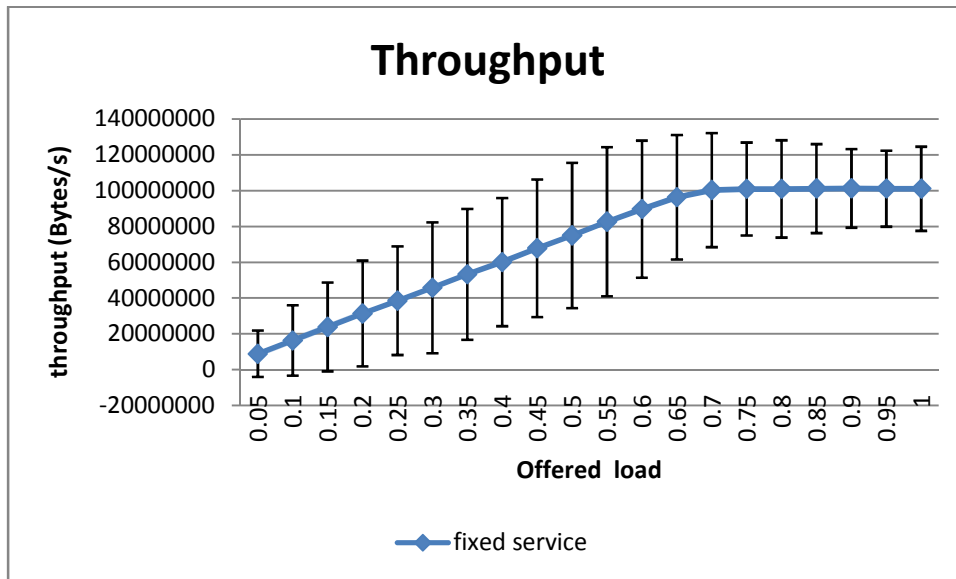


Figura 38: Throughput vs. Carga de la Red para TDM-EPON con DBA Fijo.

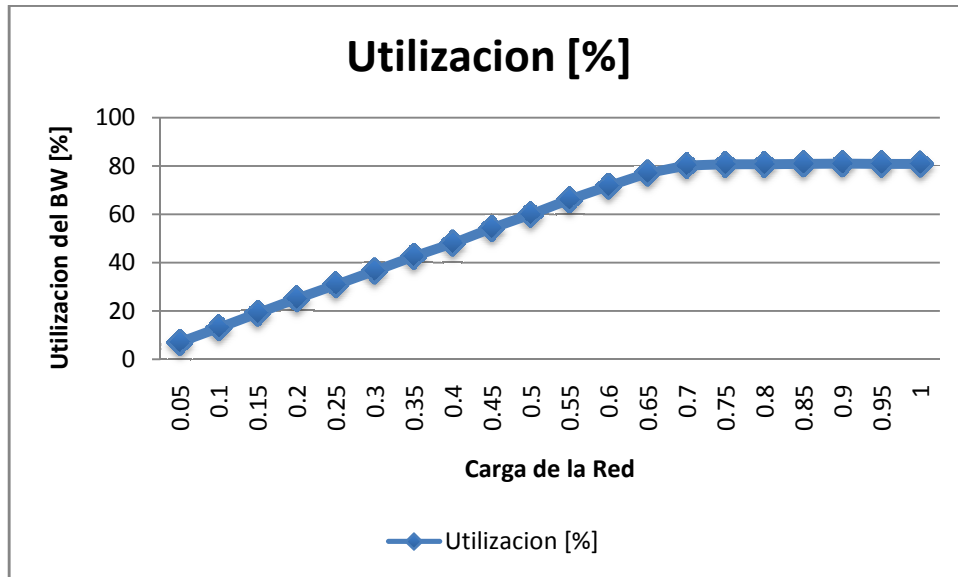


Figura 39: Utilización vs. Carga de la red para TDM-EPON con DBA Fijo.

Tras la interpretación del escenario base, se identificaron las prestaciones del esquema de asignación de ancho de banda DDSPON basados en un estudio comparativo de los parámetros evaluados para el escenario TDM-EPON con DBA fijo. Las figuras 40, 41, 42, 43, 44, reúnen la medición de parámetros cuantitativos que sirven para determinar las prestaciones de la red, bajo el efecto del algoritmo de distribución dinámica de ancho de banda DDSPON.

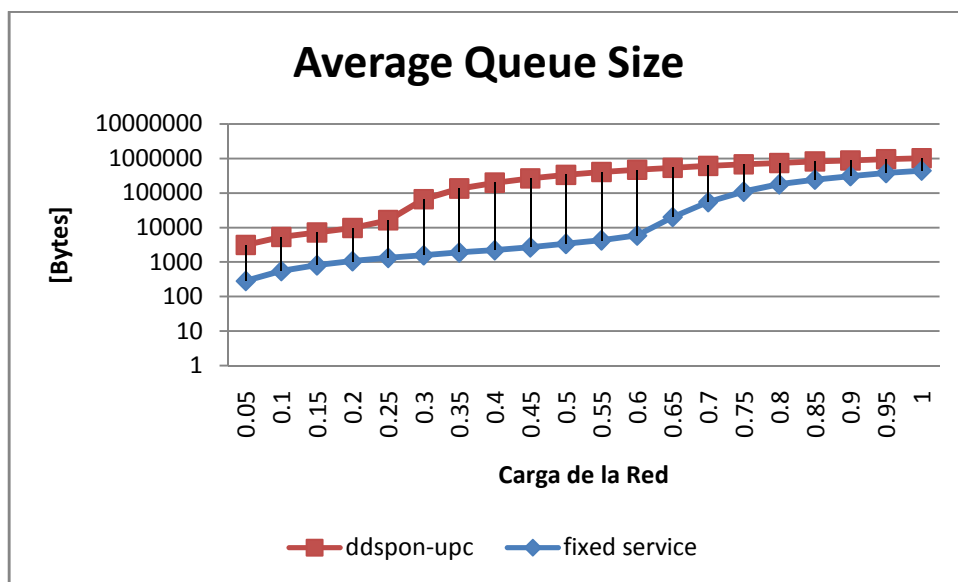


Figura 40: Tamaño Medio de Cola vs. Carga de la Red DDSPON y Fijo.

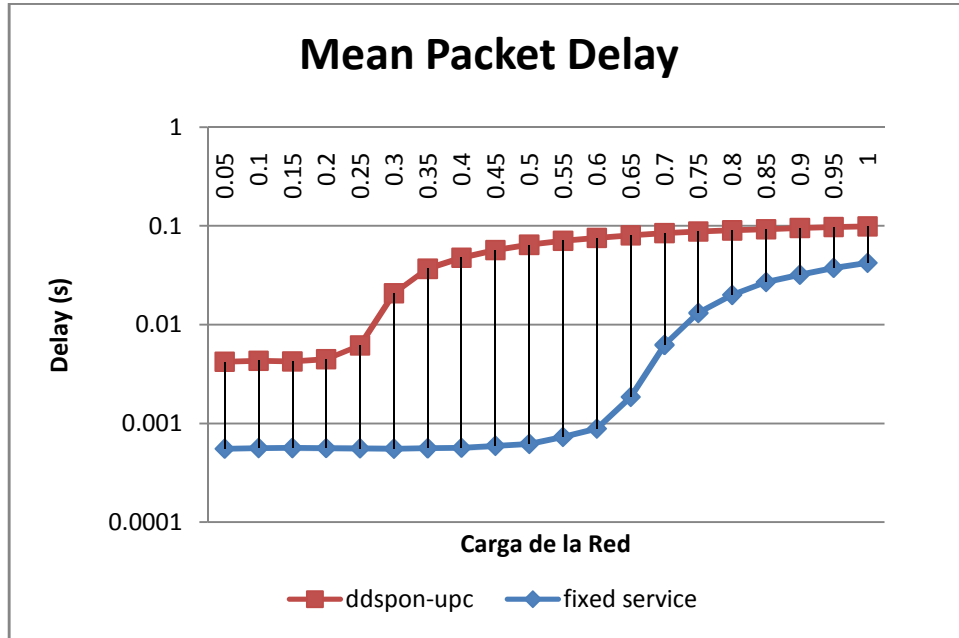


Figura 41: Retardo Medio de Paquetes vs. Carga de la Red DDSPON y Fijo.

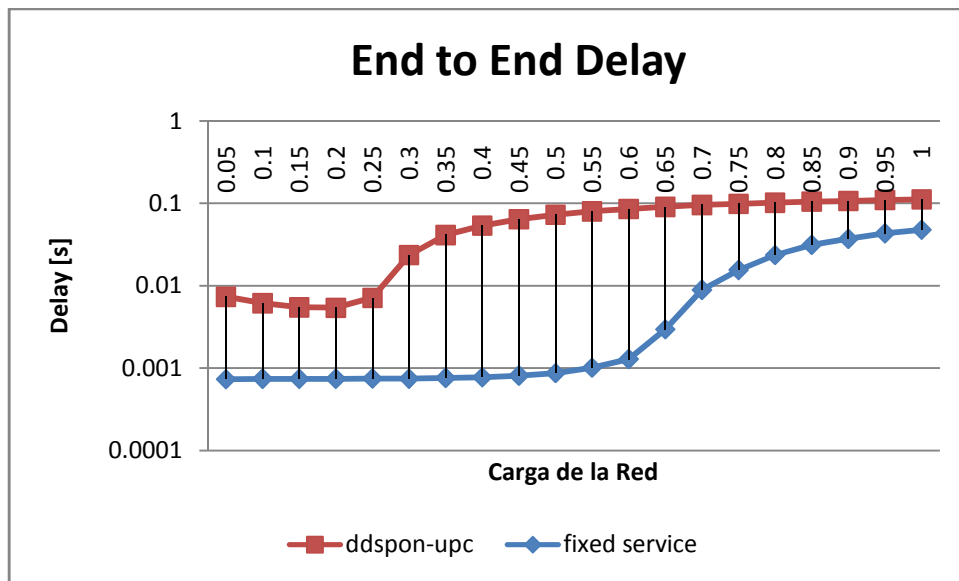


Figura 42: Retardo End to End vs. Carga de la Red DDSPON y Fijo.

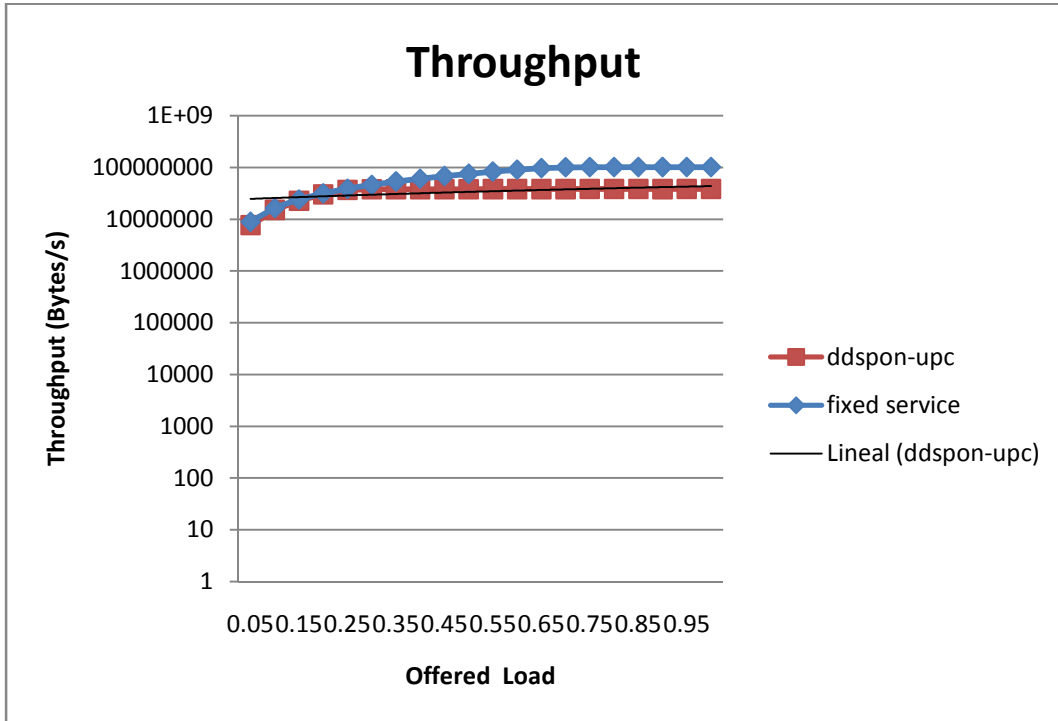


Figura 43: Throughput vs. Carga de la Red DDSPON y Fijo.

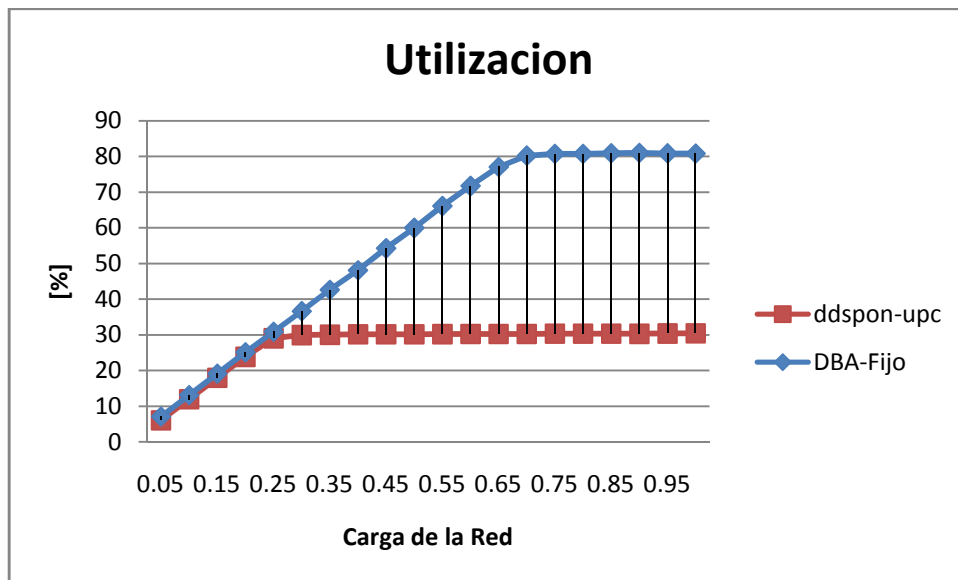


Figura 44: Utilizacion vs. Carga de la Red DDSPON y Fijo.

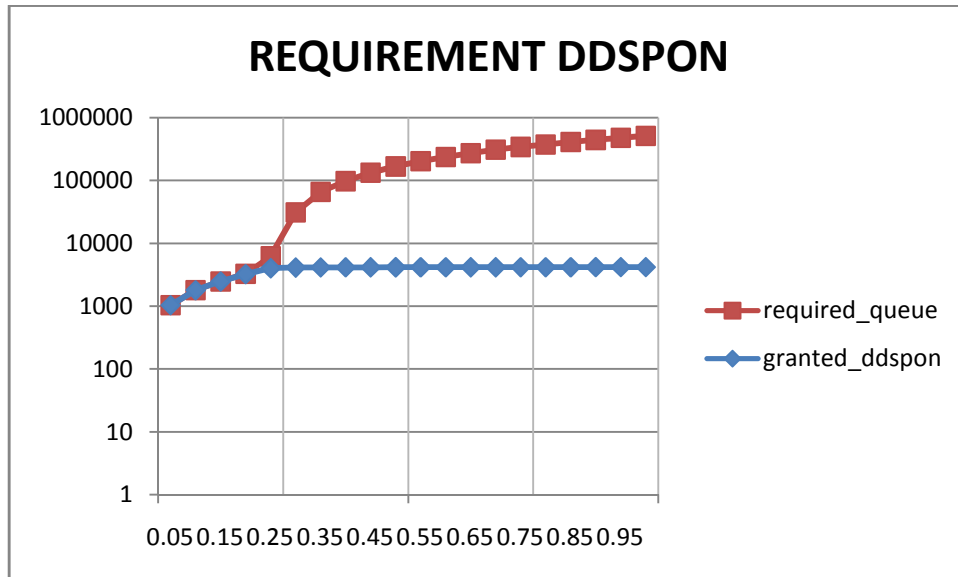


Figura 45: Solicitud y Otorgamiento de transmisión en algoritmo DDSPON

Una visión global de este estudio, referida a la medición de tamaño medio de cola, media de retardo de paquetes, retardo end-to-end, throughput y utilización del canal determina que el comportamiento de la red bajo el esquema dinámico DDSPON no contribuye a mejores prestaciones de la red bajo ninguna condición de carga. En principio, esta determinación resultó contradictoria, ya que el simple hecho de comparar un algoritmo basado en distribución dinámica versus un esquema de asignación de ancho de banda estático indicaría otro tipo de resultados. Los resultados arrojados señalan que, las ventanas de transmisión asignadas no satisfacen los requerimientos reales de las ONUs, por lo cual hay acumulación de paquetes en la cola, hecho que se traduce en mayor retardo de paquetes. Este resultado condujo a un análisis detallado del comportamiento de la red para el caso del algoritmo dinámico DDSPON. Se llevó a cabo un estudio detallado del comportamiento de la red como función del tiempo de dos (2) escenarios límites, el primero de ellos con poca generación de tráfico de red (escenario de 10%) y otro con alta generación de tráfico (escenario de 100%). Retomando el principio de operación de este algoritmo, se sabe que cada ONU determina la longitud de la ranura de transmisión a utilizar en base al cálculo de una proporción del ciclo máximo W_{max} , proporción que tiene que ver con el peso de cada ONU. De este modo, las ONUs con mayor actividad tendrán pesos mayores a aquellas inactivas o de menor actividad, y les será asignado una mayor proporción del ciclo máximo que a las restantes. Además, el algoritmo supone que, si el estado de ocupación de las colas es menor al resultado de esta proporción se solicita es esta cantidad. Los resultados de estas pruebas demostraron que para bajos niveles de tráfico el algoritmo selecciona una ventana de transmisión proporcional a su peso y actualiza el vector de pesos en el OLT de forma continua tras la llegada de mensajes de control *Report* de cada ONU. Para

elevados niveles de tráfico lo que ocurre es que el algoritmo tiende a comportarse como el DBA fijo, ya que, al crecer el tamaño de la cola de todas las ONUs en proporciones similares (igual tasa de generación de tráfico por ONU) se equiparan los pesos, otorgando aproximadamente W_{max} / N a cada ONU, idéntica al tamaño de ventana del algoritmo fijo, esta asignación se mantendrá ya que la cola continuará creciendo. Ahora, si para bajos niveles de carga en “teoría” el comportamiento es mejor, ya que solicita necesariamente lo que tiene en cola (sin desaprovechar el canal, recordamos que no hay remanente ya que se incorporó una rutina de solicitud de ventana exacta que garantice que no haya desperdicio de la ranura) y para niveles elevados de carga tiende al algoritmo fijo ¿por qué el comportamiento del sistema de comunicaciones bajo el esquema de asignación DDSPON es menos eficiente en una medida notoria?. La respuesta a esta interrogante se obtuvo analizando la transmisión de las ONUs. Se detectó que independiente de la carga de la red (baja o elevada) el tamaño del ciclo estaba alrededor de 3,2 mseg lo que equivale a unos 202000 TQs. aproximadamente, evidentemente con un ciclo tan grande el desperdicio de ancho de banda se dispara, en el peor de los casos en un ciclo podría estarse aprovechando apenas un 1%,. Este error obedece a dos (2) factores: el primero de ellos, que en el presente escenario de simulación las dieciséis (16) ONUs estaban en el borde de la distancia máxima permisible respecto al OLT, es decir, $RTT \approx 12500$ TQs. (40 useg = 20 Km) y el segundo factor es que el envío del *Gate* a la siguiente ONU en transmitir se hace justo al recibir el mensaje de Report de la ONU previa (con el fin de enviar el vector completamente actualizado para el ciclo n-1). Si observamos el ejemplo graficado en la figura 45 esta planificación “en vivo” del canal provoca un desperdicio de tiempo de transmisión de aproximadamente

$$BW_DESPERDICIADO = RTT_ONU - (TGUARD + WINDOW_LENGTH).$$

Si extendemos el ejemplo de la figura 46 al modelo de 16 ONUs, en el caso de baja carga de red, el tiempo WINDOW_LENGTH tiende a ser muy pequeño con lo cual se estará dejando libre sin planificación (BW_DESPERDICIADO) aproximadamente 12000 TQs. En el caso de alta carga de red, como el escenario supone que todas las ONUs tienen elevados niveles de generación de tráfico la máxima ventana se limitará a W_{max}/N que equivale a 3907 TQs con lo cual se continuará presentando el mismo problema.

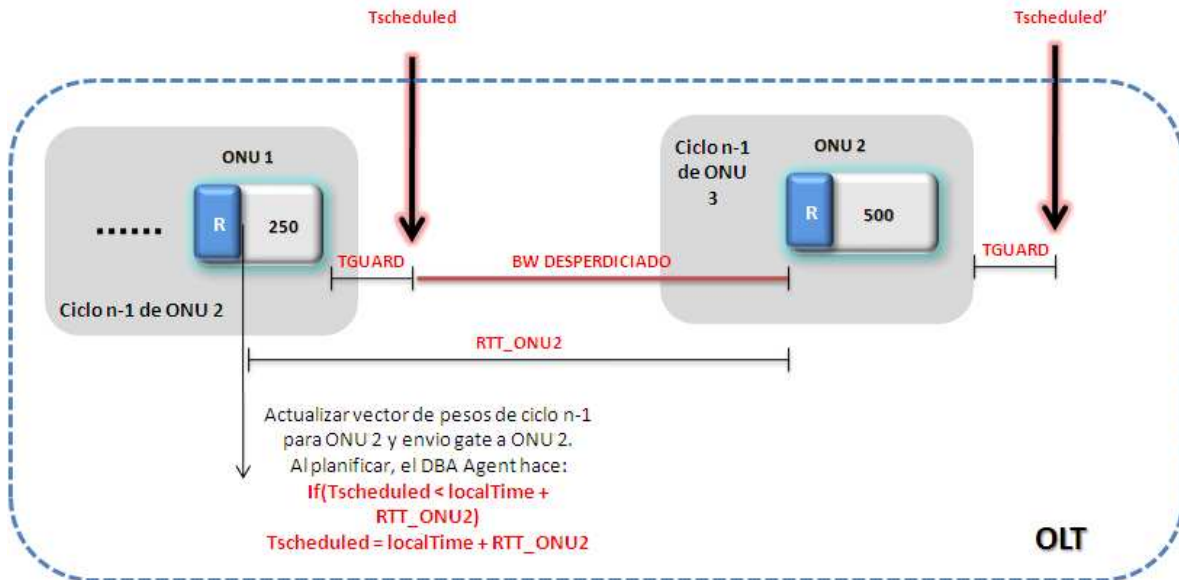


Figura 46: Problema de Operación de algoritmo DDSPON para ONUs distantes.

Tal y como fue implementado el algoritmo de asignación de ancho de banda DDSPON en el presente proyecto de investigación, donde se retrasa el envío del mensaje de control *gate* hasta la última ONU del ciclo previo, con el fin de enviar el vector de pesos **actualizado**, no permitirá obtener resultados satisfactorios para casos donde la distancia ONU-OLT sea superior a 3907 TQs y sus prestaciones decaerán con el aumento de estas distancias para escenarios de simulación que compartan estas mismas características.

Para evaluar las prestaciones de este algoritmo se podría probar con escenarios donde la distancia ONU-OLT sea inferior a **(3907 TQs + TGUARD_{500TQs})**, de este modo la planificación del canal será mucho más ajustada reduciendo el valor de BW_DESPERDICIADO y con ello el valor de ciclo máximo.

Una segunda propuesta sugiere, retrasar el envío de mensajes de control *gate* lo máximo posible, con el fin de evitar insertar en la planificación **BW_DESPERDICIADO**, ello tendría la limitante de que en muchos de los casos el vector no estaría completamente actualizado. Para el escenario donde todas las ONUs se encuentran a aproximadamente 20 Kms de distancia con carga elevada en la red con suerte podría actualizarse el vector con doce (12) valores reales, eso sería el mejor de los escenarios. Se considera que esta propuesta tiene validez en la medida en que los pesos entre ciclos no varían en gran medida al depender de un comportamiento similar a lo largo del sistema. Para detalles de esta propuesta ver Anexos.

7.1.3. Estudio de comportamiento de red EPON con tecnología de acceso TDM versus WDM.

La comparación de parámetros asociados al comportamiento de la red de tecnología TDM versus WDM reveló mejores prestaciones para el sistema con tecnología de acceso por multiplicación de longitud de onda.

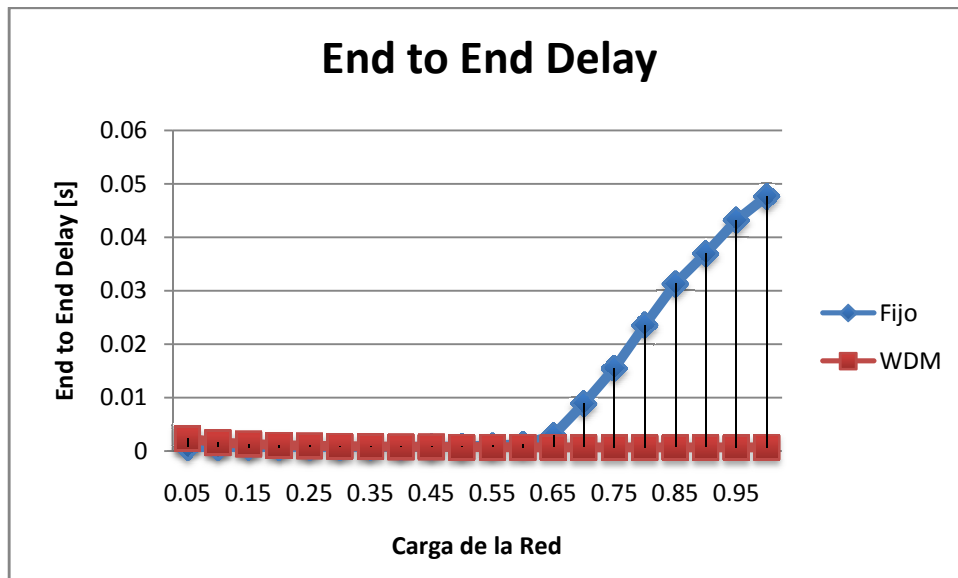


Figura 47: Retardo End to End vs. Carga de la ONU WDM – Fijo.

En la gráfica de la figura 47 se puede observar el tiempo promedio que dura un paquete desde que es creado hasta que llega al backbone, en este caso se observa claramente que la implementación de WDM arroja un end to end delay similar al de TDM cuando se trabaja con cargas pequeñas comprendidas entre el 5% y el 60%, pero luego para cargas superiores al 60% es mucho mayor la diferencia entre el end to end delay de WDM y el de TDM, esto se debe a que para cargas elevadas de la red WDM contempla el envío simultáneo de datos por varios canales mientras que en TDM se envían todos los datos por un solo canal.

La cola de la ONU disminuye de forma más rápida en la implementación de WDM que en TDM porque son atendidas más rápidamente al trabajar con 5 longitudes de onda.

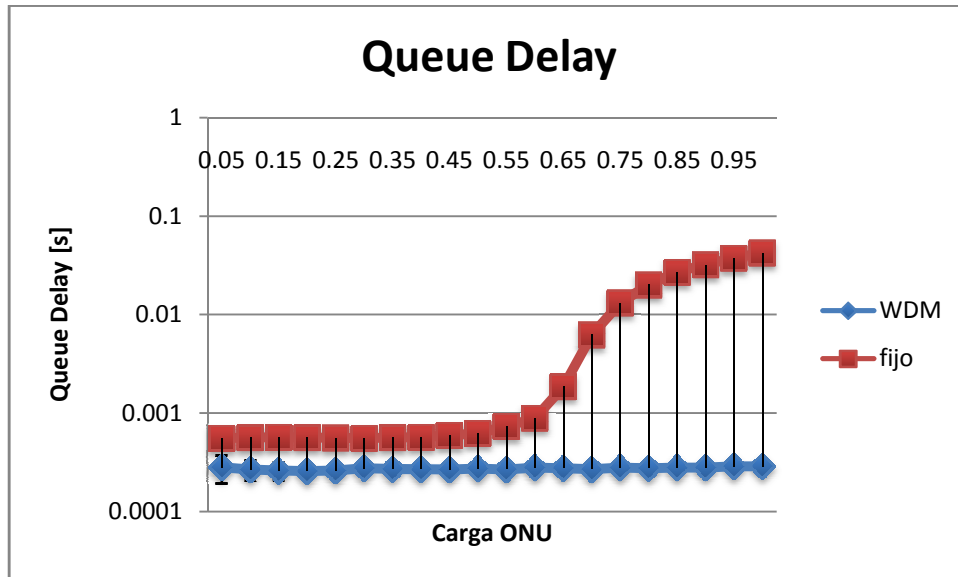


Figura 48: Retardo de Cola vs. Carga de la ONU WDM - Fijo

En la Figura 48 se puede observar que el retardo medio de los paquetes en la cola (Average Queue Delay) es significativamente inferior en la implementación WDM que en la implantación por TDM a pesar de que en ambos casos se evalúa el mismo algoritmo de asignación de ancho de banda. Se puede notar en esta gráfica que para porcentajes bajos de tráfico de red, WDM y TDM ofrecen retardos del mismo orden de magnitud (del orden de los cientos de microsegundos) manteniéndose siempre el retardo de WDM menor al de TDM, no obstante, para porcentajes de carga de red mayores, el retardo en los paquetes se torna claramente superior para TDM en relación a WDM, manteniéndose este último casi constante para todos los valores de carga simulados.

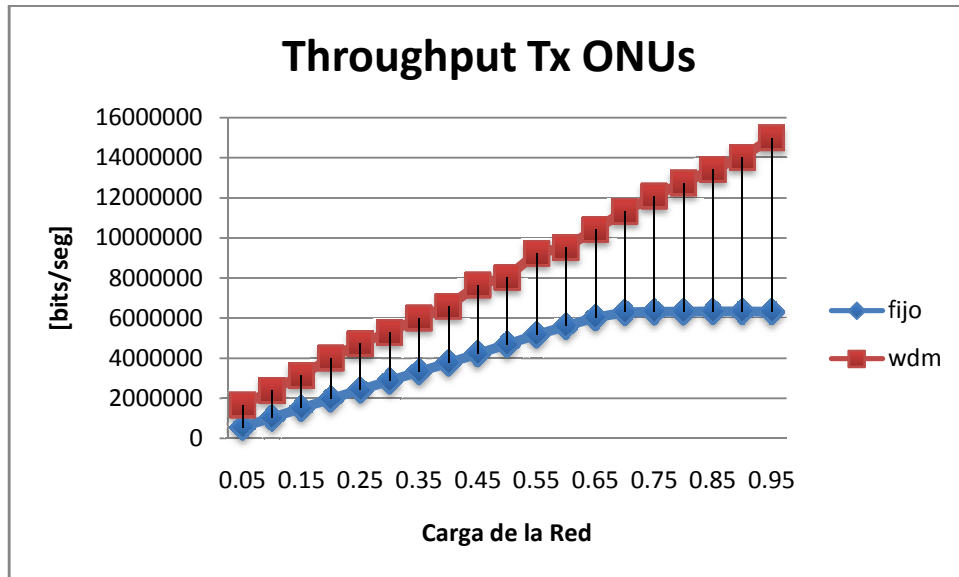


Figura 49: Throughput vs. Carga de la Red WDM – Fijo.

Se puede observar en la figura 49 que se aprovecha mucho más el canal en la implementación de WDM que en la de TDM, esto se debe a que la transmisión en dirección ONU-OLT las ONUs pueden enviar al mismo tiempo por distintos canales.

CAPITULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

El presente trabajo de investigación permitió adquirir conocimientos teóricos en torno a las tecnologías de acceso de nueva generación. Se desarrolló un modelo completo de la red de comunicaciones EPON –del inglés: *Ethernet Passive Optical Network*–, con facilidad del entorno de simulación OPNET Modeler, bajo el estricto cumplimiento del estándar 802.3ah con el fin de implementar un modelo con validez de diseño.

Los resultados de simulación permitieron verificar la validez del esquema de asignación de ancho de banda fijo y su comportamiento para variaciones de la carga de la red. Se verificó que para valores bajos de generación de tráfico hay subutilización del canal, mientras que para valores elevados de tráfico de la red, se transmite al máximo ciclo con capacidad limitada a la máxima ventana otorgada, esto provoca que la utilización del canal tienda a un valor final que permanece con aumentos de la carga. Se determinó un rango de utilización del canal del 10% al 90% para variaciones de la carga en un esquema de asignación fija.

Los resultados en torno al esquema de asignación de ancho de banda DDSPON determinaron que las condiciones de diseño bajo el cual fue implementado el modelo de red, no era comparable con el algoritmo de ventana fija, ya que, esta implementación insertaba errores de subutilización del canal significativos, marcado por parámetros de simulación comunes para todos los escenarios simulados. Se concluyó en torno al replanteamiento del diseño, tal que, el envío de mensajes de control *Gate* se haga en el máximo tiempo tardío sin importar que el vector de pesos no esté completamente actualizado, de lo contrario para valores de RTT máximos la subutilización del canal llega a ser hasta de un 99%. Sin embargo, los resultados de la simulación permitieron verificar que una redefinición del algoritmo mejoraría las prestaciones de la red, ya que para cargas de red bajas satisface el requerimiento real de las colas, anulando la subutilización del canal del caso fijo y para cargas altas tiende a comportarse como el primero de estos algoritmos, con la salvedad de que si alguna condición de tráfico varía en algunas de las ONUs el efecto será compensado por reajuste del vector de pesos otorgando ventanas de transmisión proporcionales a este parámetro.

La importancia de desarrollar proyectos en esta línea de investigación, está asociada al aporte de soluciones tecnológicas que permitan la evolución de las nuevas tecnologías comunicacionales, con el fin de mantener vigencia con nuevos servicios y demandas. Se espera que los modelos, resultados, conclusiones y evaluaciones desarrolladas en este trabajo de investigación, sirvan de base para el desarrollo de nuevos estudios en el área de las comunicaciones ópticas y la extensión del modelo a nuevos algoritmos de asignación de ancho de banda, que determinen las prestaciones del sistema de comunicaciones ante diversos esquemas de distribución. La motivación del proyecto culmina con el cumplimiento

satisfactorio de los objetivos y la determinación de un modelo que se espera sirva para futuros proyectos de investigación en el ámbito académico y empresarial.

8.2. Líneas Futuras

A continuación se enumeran las futuras líneas de investigación sugeridas para el desarrollo de proyectos tecnológicos que evalúen las prestaciones de nuevas tecnologías en el área de redes de acceso:

- Implementar otros algoritmos de asignación dinámica de ancho de banda sobre el modelo base de red EPON, con el fin de evaluar las prestaciones de otros esquemas bajo las mismas condiciones de operación y diseño.
- Implementar nuevos esquemas de asignación de ancho de banda sobre modelo de red WDM –EPON..
- Extender la implementación WDM en el canal downstream de la red, con el objeto de verificar el comportamiento de la red versus el modelo desarrollado en el presente proyecto de investigación.
- Simular escenarios que supongan el manejo de colas de prioridad para cada nodo de la red y comparar las prestaciones de esta implementación contra el modelo de cola simple.

8.3. Implicaciones Ambientales

Este proyecto de fin de carrera no presenta un impacto ambiental notorio puesto que la tecnología que se implementa es poco nociva (fibra óptica) y no genera emisiones electromagnéticas.

Respecto al proyecto sólo fue usado un ordenador que debe ser desechado correctamente cuando deje de funcionar para evitar la contaminación ambiental.

Si se llegara a implementar el proyecto tendría que tenerse cuidado con el daño que se ocasione al suelo ya que se tendría que excavar para poder realizar el despliegue de fibra óptica.

Otra observación que tiene esta tecnología es que no se generan emisiones de calor o gases nocivos que puedan afectar la salud de la comunidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] **MUKHERJEE Biswanath, KRAMER, Glen & MAISLOS, Ariel.** "Ethernet Passive Optical Networks Source", Wiley-Interscience, Nueva York, USA. (2003).

[2] **MAISLOS, Ariel.** "Guard Band Issues - EPON presentation". (2002)

[3] **DE ANDRADE, Marilet; GUTIERREZ, Lluís & SALLEN, Sebastià.** "DDSPON: A Distributed Dynamic Scheduling for EPON". Barcelona, España. (2007)

BIBLIOGRAFIA

BANERJEE, Amitabha & PARK, Youngil. “Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review [Invited]”. (2005)

KRAMER, Glen. “Ethernet Passive Optical Networks”, McGraw-Hill, Estados Unidos de América, pp. 106-159. (2005)

KRAMER, Glen & TAMAKA Keiji. “Advances in Optical Access Networks”. (2005).

MCGARRY, Michael & REISLEIN, Martin. “WDM Ethernet Passive Optical Networks”, Arizona State University (Febrero 2006).

MUKHERJEE Biswanath, KRAMER, Glen & MAISLOS, Ariel. “Ethernet Passive Optical Networks Source”, Wiley-Interscience, Nueva York, USA. (2003).

“OPNET: Manual de Usuario”. Departamento de Ingeniería Telemática. Universidad Politécnica de Catalunya. España. (2004)

SPENCER, Michael y Mark A. Summerfield. “WRAP: A Medium Access Control Protocol for Wavelength-Routed Passive Optical Networks”. Journal of Lightwave technology, vol. 18, no. 12, Dic 2000, pp 1657-1676.

ANEXO A

IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMO DE ASIGNACION DE ANCHO DE BANDA DDSPON EN LA HERRAMIENTA DE SIMULACION OPNET MODELER.

A continuación se presentan los códigos de programación modificados para la implementación del esquema de asignación de ancho de banda DDSPON.

```

1  OpT_uInt64 requirement_actual;
2
3  pkptr = op_pk_create_fmt("report");
4  op_stat_write(reporting_stat,3);
5  /*LLenar campos del MPCPDU REPORT, con informacion del DBA Agent*/
6
7  requirement_actual = (OpT_uInt64)requirement[NUMBER_ONU];
8
9  op_pk_nfd_set_int32(pkptr,"llid", llid_assigned[NUMBER_ONU]);
10 op_pk_nfd_set_int64(pkptr,"destination_address",MAC_DLT);
11 op_pk_nfd_set_int64(pkptr,"source_address",MAC_ONU);
12 op_pk_nfd_set_int32(pkptr,"length/type",34824);
13 op_pk_nfd_set_int32(pkptr,"opcode",3);
14 op_pk_nfd_set_int32(pkptr,"number_of_queue_sets",1);
15 op_pk_nfd_set_int32(pkptr,"report_bitmap",1);
16 op_pk_nfd_set_int64(pkptr,"queue_1_report",requirement[NUMBER_ONU]);
17 op_pk_nfd_set_dbl(pkptr,"weight",new_weight[NUMBER_ONU]);
18
19 op_pk_send(pkptr,OUT_STRM_CONTROL_MULTIPLEXER);
20 op_intrpt_schedule_remote(op_sim_time(),1024,op_id_from_name(op_topo_parent(op_id_
21
22 op_stat_write(requirement_stat,requirement[NUMBER_ONU]);
23
    
```

Figura 50: Reporting Process de la ONU- DDSPON

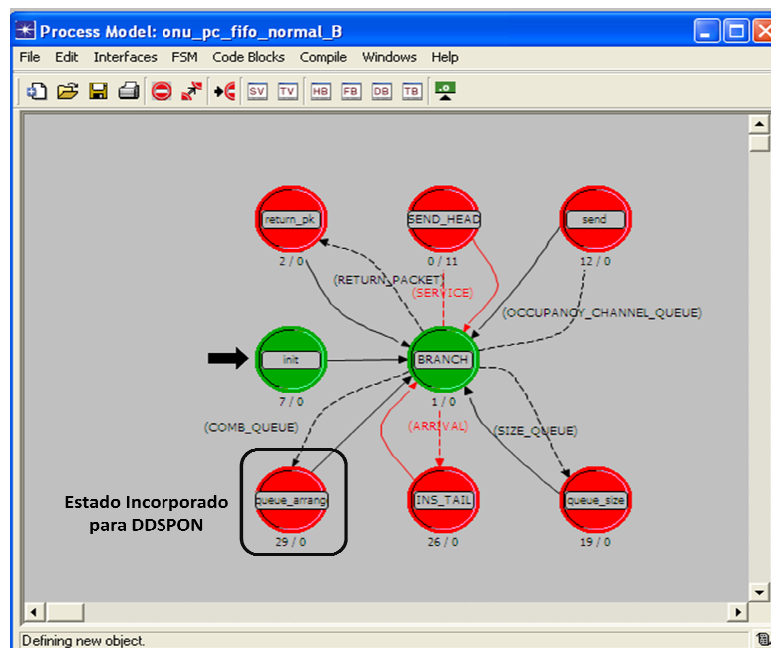


Figura 51: Proceso q_1 de la ONU - DDSPON

```

1  int i,NUMBER_PACKETS;
2  Opt_Packet_Size accumulative_size, accumulative_previous;
3
4  accumulative_size=0;
5
6  for(i=0;i<=OPC_QPOS_TAIL;i++)
7  {
8      pkptr_temp = op_subq_pk_remove(0,i);
9      accumulative_previous = accumulative_size;
10     accumulative_size=accumulative_size+op_pk_total_size_get(pkptr_temp);
11     if((requirement[NUMBER_ONU]*16)<=accumulative_size)
12     {
13         if((requirement[NUMBER_ONU]*16)<accumulative_size)
14         {
15             NUMBER_PACKETS=i;
16             requirement[NUMBER_ONU]=accumulative_previous+976+96+NUMBER_PACKETS*96;
17         }
18     }
19     else
20     {
21         NUMBER_PACKETS=i+1;
22         requirement[NUMBER_ONU]=accumulative_size+976+96+NUMBER_PACKETS*96;
23     }
24     requirement[NUMBER_ONU]=requirement[NUMBER_ONU]/16;
25     op_subq_pk_insert(0,pkptr_temp,i);
26 }
27 else
28     op_subq_pk_insert(0,pkptr_temp,i);
29 }
30

```

Figura 52: Código de Programación de nuevo estado de proceso q_1 de la ONU - DDSPON

```

39
40
41 op_stat_write(gate_rx_stat,3);
42
43
44 if(discovery[NUMBER_ONU] != 1)
45 {
46
47
48 op_pk_nfd_get_db1 (pkptr, "weight_1" , &vector[NUMBER_ONU].weight[0]);
49 op_pk_nfd_get_db1 (pkptr, "weight_2" , &vector[NUMBER_ONU].weight[1]);
50 op_pk_nfd_get_db1 (pkptr, "weight_3" , &vector[NUMBER_ONU].weight[2]);
51 op_pk_nfd_get_db1 (pkptr, "weight_4" , &vector[NUMBER_ONU].weight[3]);
52 op_pk_nfd_get_db1 (pkptr, "weight_5" , &vector[NUMBER_ONU].weight[4]);
53 op_pk_nfd_get_db1 (pkptr, "weight_6" , &vector[NUMBER_ONU].weight[5]);
54 op_pk_nfd_get_db1 (pkptr, "weight_7" , &vector[NUMBER_ONU].weight[6]);
55 op_pk_nfd_get_db1 (pkptr, "weight_8" , &vector[NUMBER_ONU].weight[7]);
56 op_pk_nfd_get_db1 (pkptr, "weight_9" , &vector[NUMBER_ONU].weight[8]);
57 op_pk_nfd_get_db1 (pkptr, "weight_10" , &vector[NUMBER_ONU].weight[9]);
58 op_pk_nfd_get_db1 (pkptr, "weight_11" , &vector[NUMBER_ONU].weight[10]);
59 op_pk_nfd_get_db1 (pkptr, "weight_12" , &vector[NUMBER_ONU].weight[11]);
60 op_pk_nfd_get_db1 (pkptr, "weight_13" , &vector[NUMBER_ONU].weight[12]);
61 op_pk_nfd_get_db1 (pkptr, "weight_14" , &vector[NUMBER_ONU].weight[13]);
62 op_pk_nfd_get_db1 (pkptr, "weight_15" , &vector[NUMBER_ONU].weight[14]);
63 op_pk_nfd_get_db1 (pkptr, "weight_16" , &vector[NUMBER_ONU].weight[15]);
64
65 op_stat_write(vector_stat,vector[NUMBER_ONU].weight[1]);
66
67 switch (grant_number[NUMBER_ONU])
68 {
69     case 0: // Mensaje solo de sincronización
70         op_pk_destroy(pkptr);
71         op_stat_write(gate_rx_stat,8.5);
72         break;
73
74     case 1: // Un (1) Grant otorgado.
75         op_stat_write(gate_rx_stat,4);
76         op_pk_nfd_get_db1 (pkptr, "grant_1_start_time" , &start_time[0]);

```

Figura 53; Código de programación de proceso *Gate Reception* de la ONU para DDSPON

```

dba_ddspn_last_version.dba.Enter Executives
File Edit Options
30 // - "force report" (bits 0-3)
31
32 field_temp = 40; // ONE GRANT GIVEN
33 // DISCOVERY BIT = 0 => NORMAL GATE
34 // ONE FORCED REPORT REQUESTED
35
36 number_of_grants_flags [INSTANCE_TX]=field_temp;
37
38 op_stat_write(instance_stat,INSTANCE_TX);
39 // ORDER THE GATE GENERATION MODULE TO ISSUE A GATE MESSAGE WITH THE PRECALCULATED INFORMATION
40 op_intrpt_schedule_remote (op_sml_time (), SEND_GATE, objid_gate_generation [INSTANCE_TX]);
41
42 op_stat_write(DBA_agent_STATE,4);
43 op_stat_write(DBA_agent_STATE,INSTANCE_TX+10);
44
45 }
46
47
48 else { //DETERMINE THE START_TIME AND LENGTH OF TRANSMISSION GRANT
49 {
50
51 tscheduled_temp=tscheduled;
52
53 // DETERMINE THE NUMBER OF INSTANCE THAT IS REQUESTING TO TIMESTAMP A GATE MESSAGE AT THE CONTROL MULTIPLEXER
54 op_ima_obj_attr_get (op_intrpt_source(), "instance_ID", &current_onu);
55
56 // DETERMINE THE POSITION OF LOCALTIME FLAG AND TSCHEDULED FLAG, IN MEANS OF CYCLE
57
58 if (Flag_localTime_OLT ==FALSE && Flag_tscheduled ==FALSE) // BOTH FLAGS ARE IN THE SAME CYCLE
59 {
60 if (tscheduled < localTime_OLT + Tdelta + RTT[current_onu])
61 {tscheduled = localTime_OLT + Tdelta + RTT[current_onu];
62 op_stat_write(testing_stat,1);
63 }
64 else
65 {op_stat_write(testing_stat,2);
66 }
67
68
69 else if (Flag_localTime_OLT ==FALSE && Flag_tscheduled ==TRUE) // THE TIME SCHEDULED IS IN THE NEXT CYCLE, TSCHEDULED KEEPS BEING AHEAD OF LOCALTIME EVEN
70 //THOUGH ITS ABSOLUTE VALUE IS MINOR
71 {
72 if (((4294967295-localTime_OLT)+tscheduled)<Tdelta+RTT[current_onu])
73 tscheduled=Tdelta+RTT[current_onu]-(4294967295-localTime_OLT);
74 }
75
76 else if (Flag_localTime_OLT ==TRUE && Flag_tscheduled ==FALSE) // THE LOCALTIME COUNTER IS AHEAD OF THE TIME SCHEDULED
77 {
78 tscheduled = localTime_OLT + Tdelta + RTT[current_onu];
79 }
80
81 //THE GRANTS LENGTH, IS THE ONU TRANSMISSION SIZE REQUIREMENT R[current_onu]
82 length = queue_l_report [current_onu] + TREPORT + TON + synctime + TOFF;
83
84 grant_l_length [current_onu] = length;
85 grant_l_starttime [current_onu] = tscheduled - RTT[current_onu];
86
87 tscheduled = tscheduled + length + Tguard;
88
89 // DETERMINE IF THE CYCLE HAS PASSED, OR IT REMAINS IN THE SAME CYCLE OF TIME
90 if (tscheduled-tscheduled_temp < 0)
91 Flag_tscheduled = TRUE;
92
93 //REGISTER STATISTICS
94
95 op_stat_write(DBA_agent_STATE,1);
96 //op_stat_write(DBA_agent_ST,current_onu);
97 op_stat_write(DBA_agent_ST,grant_l_starttime [current_onu]);
98 op_stat_write(DBA_agent_LI,localTime_OLT);
99 op_stat_write(DBA_agent_LENGTH,grant_l_length [current_onu]);
100
101 }
102

```

Figura 54: Código de programación de proceso *DBA Agent* de la ONU para DDSPON

```

olt_gating_process_ddspn.send_gate.Enter Executives
File Edit Options
1 int t;
2
3 op_ev_cancel (handle_gate_periodic_timer);
4
5 pkptr = op_pk_create_fmt ("gate"); // create a GATE packet setting all its f
6
7 op_pk_nfd_set_int64 (pkptr, "destination_address" ,MAC_address_ONU[INSTANCE_ID]);
8 op_pk_nfd_set_int64 (pkptr, "source_address" ,MAC_address_OLT);
9 op_pk_nfd_set_int32 (pkptr, "llid" ,LLID[INSTANCE_ID]);
10 op_pk_nfd_set_int32 (pkptr, "length/type" ,0x8808);
11 op_pk_nfd_set_int32 (pkptr, "opcode" ,2);
12 op_pk_nfd_set_int32 (pkptr, "number_of_grants/flag" ,number_of_grants_flags [INSTANCE_
13 op_pk_nfd_set_int32 (pkptr, "grant_1_start_time" ,grant_1_starttime [INSTANCE_
14 op_pk_nfd_set_int32 (pkptr, "grant_1_length" ,grant_1_length [INSTANCE_
15 op_pk_nfd_set_int32 (pkptr, "grant_2_start_time" ,grant_2_starttime [INSTANCE_
16 op_pk_nfd_set_int32 (pkptr, "grant_2_length" ,grant_2_length [INSTANCE_
17 op_pk_nfd_set_int32 (pkptr, "grant_3_start_time" ,grant_3_starttime [INSTANCE_
18 op_pk_nfd_set_int32 (pkptr, "grant_3_length" ,grant_3_length [INSTANCE_
19 op_pk_nfd_set_int32 (pkptr, "grant_4_start_time" ,grant_4_starttime [INSTANCE_
20 op_pk_nfd_set_int32 (pkptr, "grant_4_length" ,grant_4_length [INSTANCE_
21 op_pk_nfd_set_dbl (pkptr, "weight_1" , weight_vector[1]);
22 op_pk_nfd_set_dbl (pkptr, "weight_2" , weight_vector[2]);
23 op_pk_nfd_set_dbl (pkptr, "weight_3" , weight_vector[3]);
24 op_pk_nfd_set_dbl (pkptr, "weight_4" , weight_vector[4]);
25 op_pk_nfd_set_dbl (pkptr, "weight_5" , weight_vector[5]);
26 op_pk_nfd_set_dbl (pkptr, "weight_6" , weight_vector[6]);
27 op_pk_nfd_set_dbl (pkptr, "weight_7" , weight_vector[7]);
28 op_pk_nfd_set_dbl (pkptr, "weight_8" , weight_vector[8]);
29 op_pk_nfd_set_dbl (pkptr, "weight_9" , weight_vector[9]);
30 op_pk_nfd_set_dbl (pkptr, "weight_10" , weight_vector[10]);
31 op_pk_nfd_set_dbl (pkptr, "weight_11" , weight_vector[11]);
32 op_pk_nfd_set_dbl (pkptr, "weight_12" , weight_vector[12]);
33 op_pk_nfd_set_dbl (pkptr, "weight_13" , weight_vector[13]);
34 op_pk_nfd_set_dbl (pkptr, "weight_14" , weight_vector[14]);
35 op_pk_nfd_set_dbl (pkptr, "weight_15" , weight_vector[15]);
36 op_pk_nfd_set_dbl (pkptr, "weight_16" , weight_vector[16]);
37
38 //op_pk_nfd_set_int32 (pkptr, "pad", pad[INSTANCE_ID]);
39 //op_pk_nfd_set_int32 (pkptr, "fcs", fcs[INSTANCE_ID]);
40
41 op_pk_send(pkptr,OUT_CONTROL_MULTIPLEXER); // Send the packet to the control
42
43 for(t=1;t<=16;t++)
44 op_stat_write(weight_stat,weight_vector[t]);
45
46
47 op_stat_write(handle_prueba_gating_process,3);
48
Line: 1

```

Figura 55: Código de programación de proceso *Gate Generation* del OLT para DDSPON


```

olt_report_reception_ddspn.receive_report.Enter.Executives
File Edit Options
1 //Declaration of temporal variables for the process
2 int i, number_onu;
3
4 // Parse the incoming REPORT frame and extract its various fields
5 pkptr = op_pk_get (IN_CONTROL_PARSER);
6
7 if(MAC_address_ONU[INSTANCE_ID]!=16)
8     number_onu = (int)MAC_address_ONU[INSTANCE_ID];
9
10 else
11     number_onu = 0;
12
13 op_pk_nfd_get_int32 (pkptr, "number_of_queue_sets" , &number_of_queue_sets[INSTANCE_ID]);
14 op_pk_nfd_get_int64 (pkptr, "report_bitmap" , &report_bitmap[INSTANCE_ID]);
15 op_pk_nfd_get_int64 (pkptr, "queue_1_report" , &queue_1_report[INSTANCE_ID]);
16 op_pk_nfd_get_int64 (pkptr, "queue_2_report" , &queue_2_report[INSTANCE_ID]);
17 op_pk_nfd_get_int64 (pkptr, "queue_3_report" , &queue_3_report[INSTANCE_ID]);
18 op_pk_nfd_get_int64 (pkptr, "queue_4_report" , &queue_4_report[INSTANCE_ID]);
19 op_pk_nfd_get_int64 (pkptr, "queue_5_report" , &queue_5_report[INSTANCE_ID]);
20 op_pk_nfd_get_int64 (pkptr, "queue_6_report" , &queue_6_report[INSTANCE_ID]);
21 op_pk_nfd_get_int64 (pkptr, "queue_7_report" , &queue_7_report[INSTANCE_ID]);
22 op_pk_nfd_get_int64 (pkptr, "queue_8_report" , &queue_8_report[INSTANCE_ID]);
23 op_pk_nfd_get_db1 (pkptr, "weight" , &actual_weight[number_onu]);
24
25 op_pk_destroy(pkptr);
26
27 complete_cycle[INSTANCE_ID]=1;
28
29 //COMPARISON OF NEW WEIGHT WITH FIXED WEIGHT, UPDATE THE WEIGHT VECTOR FOR CYCLE "n" WITH THE SMALLEST VALUE
30
31 if(actual_weight[number_onu]<fixed_weight[number_onu])
32 {
33     weight_vector[number_onu] = actual_weight[number_onu];
34 }
35 else
36 {
37     weight_vector[number_onu] = fixed_weight[number_onu];
38 }
39
40 op_stat_write(locate_stat,10+REGISTERED_ONUS);
41
42 for(i=1;i<=connected_ONUS;i++)
43 {
44     if(i!=INSTANCE_ID && registered_OLT[i]==TRUE)
45     {
46         ++complete_cycle[i];
47         op_stat_write(locate_stat,1);
48         op_stat_write(complete_stat,complete_cycle[i]);
49     }
50     else
51     {
52         op_stat_write(locate_stat,1.5);
53     }
54     if(complete_cycle[i]==REGISTERED_ONUS)
55     {
56         op_stat_write(locate_stat,2);
57         INSTANCE_TX = i;
58         op_stat_write(locate_stat,INSTANCE_TX+30);
59         op_intrpt_schedule_remote(op_sim_time(),MACI_report_reception,objid_DBA_agent); //Notify the DBA AGENT the generation of a gate MPCPDU.
60     }
61     else
62     {
63         op_stat_write(locate_stat,2.5);
64     }
65 }
66
67 op_ev_cancel (last_timer); //Cancel the prior MPCP timer
68
69 //op_stat_write(handle_prueba_report_reception,2);
70 op_stat_write(handle_prueba_report_reception,queue_1_report[INSTANCE_ID]);
71

```

Figura 56: Código de programación de proceso *Report Reception* del OLT para DDSPON