

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DE UNA RED DE ACCESO FTTH-EON EN LA
PRESTACIÓN DE SERVICIOS TRIPLAY MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO DE
ASIGNACIÓN DINÁMICO DE ESPECTRO**



JHON FREDY SACANAMBOY IMBACHI

**Documento Final de Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones**

Director:
PhD. José Giovanni López Perafán

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones Departamento de
Telecomunicaciones
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones – GNTT
Sistemas de Comunicaciones Ópticos
Popayán, Cauca 2022**

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DE UNA RED DE ACCESO FTTH-EON EN LA
PRESTACIÓN DE SERVICIOS TRIPLAY MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO DE
ASIGNACIÓN DINÁMICO DE ESPECTRO**

JHON FREDY SACANAMBOY IMBACHI

**Documento Final de Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones**

Director:
PhD. José Giovanni López Perafán

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones Departamento de
Telecomunicaciones
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones – GNTT
Sistemas de Comunicaciones Ópticos
Popayán, Cauca 2022**

Dedico este triunfo con Amor
A Dios todo poderoso
A mi padre, Benito Sacanamboy, por inculcarme tan gratos valores para afrontar la vida
A mi madre, Rosa Elia Imbachi, por darme la vida
A mi hermana, Eilin Yadin Sacanamboy, por su apoyo incondicional
A mi hijo, Alan Gabriel Sacanamboy, por ser mi fuente de inspiración
A Anyi Vanessa, por ser un apoyo incondicional y compañera de vida

Jhon Fredy Sacanamboy Imbachi

AGRADECIMIENTOS

EL autor expresa su agradecimiento al PhD. José Giovanny López Perafán, Director del Proyecto, por su orientación en este trabajo de grado.

A Jorge Iván Medina Alarcón, por sus aportes y recomendaciones.

A la Universidad del Cauca, al programa de ingeniería electrónica y telecomunicaciones por su formación.

A Residencias Universitarias estudiantiles masculinas 4 de marzo, por brindarme un hogar durante toda mi formación académica.

Agradecimientos a todos los ingenieros y profesores que hicieron parte de mi formación universitaria.

También expreso un agradecimiento especial a familiares y amigos por su apoyo, con el cual culmino satisfactoriamente esta etapa de mi vida.

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. Generalidades de las redes ópticas.....	5
1.1. Aspectos generales de las redes ópticas.....	5
1.1.1. Tecnología WDM.....	5
1.1.2. Sistemas CWDM.....	7
1.1.3. Sistemas DWDM.....	7
1.2. Redes ópticas pasivas – Passive Optical Networks (PON).....	8
1.2.1 Redes ópticas pasivas con capacidad Gigabit – Passive Optical Networks (GPON)..	9
1.3. Tecnología FTTx.....	14
1.3.1. Arquitectura FTTx.....	15
1.4. Generalidades redes ópticas elásticas - Elastic Optical Networks.....	18
1.4.1. Conceptos básicos de una red óptica elástica.....	19
1.5. Características de las redes ópticas elásticas (EON).....	32
1.5.1. Capacidad en la red para ajustarse dinámicamente al ancho de banda.....	32
1.5.2. Sistemas de transmisión para redes ópticas elásticas.....	34
1.5.3. Arquitectura de una red óptica elástica.....	37
1.5.4. Arquitectura de red de trayectoria óptica elástica cortada por espectro (SLICE).....	39
CAPÍTULO II. Algoritmos, herramientas de simulación y metodologías.....	40
2.1. Algoritmos para la asignación de recursos en redes ópticas elásticas.....	40
2.1.1. Algoritmos estáticos.....	40
2.1.2. Algoritmos dinámicos.....	41
2.1.3. Algoritmos RSA.....	41
2.2. Herramientas de simulación.....	43
2.2.1. MATLAB.....	44
2.2.2. OMNeT ++.....	44
2.2.3. OptiSystem.....	45
2.2.4. OptSim.....	45
2.3. Monitoreo del desempeño óptico OPM (Optical Performance Monitoring).....	49
2.3.1. Factor Q.....	50
2.3.2. Tasa de error de bit (BER, Bit Error Rate).....	50

2.3.3. Relación señal a ruido óptica (OSNR).....	51
2.3.4. Diagrama del ojo.	51
2.3.5. Jitter.	53
2.4. Metodología de investigación.	53
2.5. Metodología de simulación.	54
CAPÍTULO III. Desarrollo e implementación del entorno de simulación.	57
3.1. Definición del escenario de simulación.	57
3.1.1. Modelo físico de la red FTTH-GPON.....	61
3.2. Inclusión del algoritmo en la red.	63
3.2.1. Algoritmo clásico exact fit (EF).	63
3.2.2. Algoritmo diseñado (Péndulo dinámico).	64
3.3. Entorno de co-simulación (Módulo Matlab).....	69
3.3.1. Conexión co-simulación [42].	69
3.4. Modelo físico de la red FTTH-EON al integrar el módulo matlab.	70
3.4.1. Escenarios de simulación.....	71
3.4.2. Configuración de los parámetros de simulación.	73
3.5 Ejecución de las simulaciones.	73
CAPÍTULO IV. Análisis de resultados, conclusiones y trabajos futuros.	80
4.1. Sistema FTTH-EON triple play.	80
4.1.1. Resultados obtenidos en relación a OPM con el algoritmo péndulo dinámico.....	81
4.1.1. Resultados obtenidos en relación a OPM con el algoritmo Exact FIT.	89
4.2 Tablas de resultados.	97
4.3. Gráficas de resultados.	100
4.4. Ilustración de las gráficas de asignación de espectro de la señal de información en diferentes etapas de asignación del sistema.	108
4.4.1 Asignación de 16 slots.	108
4.4.2 Asignación de 8 slots.	110
4.5 Conclusiones.	112
4.6 Recomendaciones.	113
4.7 Trabajos futuros.....	114
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	115

Lista de Figuras

FIGURA 1.1. ESQUEMA BÁSICO DE UN SISTEMA BASADO EN WDM. ADAPTADA DE [6].	6
FIGURA 1.2. VENTANAS Y RANGOS DE OPERACIÓN EN REDES ÓPTICAS. ADAPTADA DE [10].	6
FIGURA 1.3. RED ÓPTICA PASIVA (PON). TOMADA DE [12].	9
FIGURA 1.4. TOPOLOGÍA PUNTO A PUNTO. TOMADA DE [49].	11
FIGURA 1.5. TOPOLOGÍA PUNTO A MULTIPUNTO. TOMADA DE [49].	11
FIGURA 1.6. TOPOLOGÍA EN BUS. TOMADA DE [12].	12
FIGURA 1.7. TOPOLOGÍA EN ESTRELLA. TOMADA DE [12].	13
FIGURA 1.8. TOPOLOGÍA EN ÁRBOL. TOMADA DE [12].	13
FIGURA 1.9. TOPOLOGÍA EN ANILLO Y DOBLE ANILLO. TOMADA DE [12].	14
FIGURA 1.10. RED DE DISTRIBUCIÓN ÓPTICA. TOMADA DE [14].	15
FIGURA 1.11. CLASES DE ESCENARIOS DE FTTX. TOMADA DE [16].	16
FIGURA 1.12. ONT HG847H. TOMADA DE [12].	18
FIGURA 1.13. ARQUITECTURA DE UNA EON, TOMADA DE [3].	19
FIGURA 1.14. REJILLA WDM ESQUEMA ASIGNACIÓN RECURSOS, (A). CANALES SEPARADOS 100GHZ, (B). CANALES SEPARADOS 50 GHZ Y (C). CANALES SEPARADOS 25 GHZ. TOMADA DE [24].	20
FIGURA 1.15. REJILLA FLEXIBLE, (A) CONFORMACIÓN DE SLICES Y (B). CONFORMACIÓN DE SLOTS. ADAPTADA DE [21].	21
FIGURA 1.16. EJEMPLO DE CONCEPTO DE RANURA Y CF. ADAPTADA DE [24].	22
FIGURA 1.17. REPRESENTACIÓN LÓGICA DE UN ENLACE DE FIBRA ÓPTICA FLEXGRID. ADAPTADA DE [26].	23
FIGURA 1.18. EJEMPLO DE CONTINUIDAD Y CONTIGÜIDAD. TOMADA DE [25].	24
FIGURA 1.19. RUTA CAMINO MÁS CORTO (NODO 0 A NODO 2). TOMADA DE [24].	25
FIGURA 1.20. RUTAS: PRIMARIA Y ALTERNATIVA (NODO 0 A NODO 2). TOMADA DE [24].	26
FIGURA 1.21. RUTA ADAPTIVA (NODO 0 A NODO 2). TOMADA DE [24].	27
FIGURA 1.22. ESQUEMA DE ASIGNACIÓN DE ESPECTRO FIJO: A) ANCHO DE BANDA REQUERIDO Y B) ANCHO DE BANDA ASIGNADO. ADAPTADA DE [25].	28
FIGURA 1.23. ESQUEMA ASIGNACIÓN DE ESPECTRO SEMI-ELASTICO EN RSA: A) REDUCCIÓN DEL ANCHO DE BANDA REQUERIDO Y B) INCREMENTO DEL ANCHO DE BANDA ASIGNADO. ADAPTADA DE [25].	29
FIGURA 1.24. ESQUEMA ASIGNACIÓN COMPARTIDO SEMI-ELASTICO EN RSA. ADAPTADA DE [28].	30
FIGURA 1.25. ESQUEMA ASIGNACIÓN DE ESPECTRO ELÁSTICO CON EXPANSIÓN/CONTRACCIÓN EN RSA. ADAPTADA DE [28].	31
FIGURA 1.26. ESQUEMA DE REASIGNACIÓN DE ESPECTRO ELÁSTICO EN RSA. ADAPTADA DE [28].	31
FIGURA 1.27. DIFERENCIA ASIGNACIÓN DE ESPECTRO ENTRE WDM (RÍGIDO) Y FLEXGRID (ELÁSTICO). TOMADA DE [29].	33
FIGURA 1.28. ESPECTRO DE SEÑALES A) WDM Y B) OFDM. ADAPTADA DE [21].	35
FIGURA 1.29. SEÑAL OFDM – WDM. TOMADA DE [50].	35
FIGURA 1.30. SEÑAL OFDM EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA. TOMADA DE [20].	36
FIGURA 1.31. SEÑAL N-WDM EN EL DOMINIO DE A) TIEMPO Y B) FRECUENCIA. TOMADA DE [20].	37
FIGURA 1.32. DIFERENCIAS DE ALCANCE ENTRE LAS ARQUITECTURAS SLICE, FWDM Y LA RED ÓPTICA ELÁSTICA CON TASA DE DATOS. ADAPTADA DE [21].	38
FIGURA 2.1. EJEMPLO DE FUNCIONAMIENTO DEL ALGORITMO FIRST FIT. ADAPTADA DE [25].	41
FIGURA 2.2. EJEMPLO DE FUNCIONAMIENTO DEL ALGORITMO RANDOM FIT. ADAPTADA DE [25].	42
FIGURA 2.3. EJEMPLO DE FUNCIONAMIENTO DEL ALGORITMO LAST FIT. ADAPTADA DE [25].	42
FIGURA 2.4. EJEMPLO DE FUNCIONAMIENTO DEL ALGORITMO PÉNDULO. TOMADA DE [37].	43

FIGURA 2.5. LOGO DE LA HERRAMIENTA MATLAB. TOMADA DE [38].	44
FIGURA 2.6. LOGO OMNET++. TOMADA DE [39].	45
FIGURA 2.7. LOGO DE LA HERRAMIENTA OPTISYSTEM. TOMADA DE [40].	45
FIGURA 2.8. TÉCNICAS DE SIMULACIÓN DE LA HERRAMIENTA OPTSIM. TOMADA DE [42].	47
FIGURA 2.9. LOGO DE LA HERRAMIENTA OPTSIM. TOMADA DE [43].	48
FIGURA 2.10. PARÁMETROS DEL DIAGRAMA DEL OJO. TOMADO DE [47].	52
FIGURA 2.11. EFECTOS DE DISTORSIÓN, JITTER Y MARGEN DE RUIDO. TOMADA DE [16].	52
FIGURA 2.12. EFECTO PRONUNCIADO DE JITTER EN EL DIAGRAMA DEL OJO. TOMADO DE [16].	53
FIGURA 2.13. MODELO EN CASCADA. TOMADA [48].	54
FIGURA 2.14. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA DE LA SIMULACIÓN.	56
FIGURA 3.1. DIAGRAMA GENERAL DE LA RED FTTH/GPON TRIPLE PLAY. TOMADA DE [12].	57
FIGURA 3.2. MODELO CONCEPTUAL DEL TERMINAL DE LÍNEA ÓPTICO (OLT) DENTRO DE LA RED FTTH-GPON TRIPLE PLAY. TOMADA DE [13].	58
FIGURA 3.3. MODELO CONCEPTUAL DEL TERMINAL DE RED ÓPTICO (ONT) DENTRO DE LA RED FTTH-GPON TRIPLE PLAY. TOMADA DE [13].	58
FIGURA 3.4. MODELO GENERAL EN OPTSIM DE LA RED FTTH/GPON PARA SERVICIOS TRIPLE PLAY.	61
FIGURA 3.5. COMPONENTES DE LA RED PARA LOS SERVICIOS DE VOZ, DATOS Y VIDEO EN LA OLT, AL INTERIOR DE LA OFICINA CENTRAL (OC).	62
FIGURA 3.6. ELEMENTOS EN EL INTERIOR DE CADA ONT EN LA RED DE ACCESO.	62
FIGURA 3.7. ARCHIVOS DE CONFIGURACIÓN.	66
FIGURA 3.8. PSEUDOCÓDIGO LÓGICA ALGORITMO, ARCHIVO CCM_ALGORITHMV2_VB.	67
FIGURA 3.9. PSEUDOCÓDIGO ASIGNACIÓN DE FRECUENCIAS PARA LOS SERVICIOS HACIA LAS OLT.	68
FIGURA 3.10. PSEUDOCÓDIGO FUNCIÓN PÉNDULO.	69
FIGURA 3.11. ESCENARIO GENERAL.	70
FIGURA 3.12. ENLACE BACK TO BACK RED FTTH-EON.	74
FIGURA 3.13. DIAGRAMA DE OJO DE LA SEÑAL DE VOZ Y DATOS PARA UNA ONT EN RX.	75
FIGURA 3.14. DIAGRAMA DE OJO DE LA SEÑAL DE VIDEO PARA UNA ONT EN RX.	75
FIGURA 3.15. CONSTELACIÓN SERVICIO DE VIDEO PARA UNA ONT EN TX Y EN RX.	76
FIGURA 3.16. ESPECTRO ÓPTICO EN TX Y ESPECTRO ÓPTICO EN RX.	76
FIGURA 3.17. RED PARA 4 ONT CON UNA DISTANCIA DE 20KM Y UNA VELOCIDAD DE 1.25 GBPS CON REJILLA DE 8 SLOTS.	78
FIGURA 3.18. RED PARA 4 ONT CON UNA DISTANCIA DE 20KM Y UNA VELOCIDAD DE 1.25 GBPS CON REJILLA DE 8 SLOTS.	78
FIGURA 3.19. RED PARA 8 ONT CON UNA DISTANCIA DE 20KM Y UNA VELOCIDAD DE 2.5 GBPS CON REJILLA DE 16 SLOTS.	79
FIGURA 4.1. BER VS ORDEN DE ASIGNACIÓN DE ONTS EN EL ESPECTRO, EXACT-FIT.	100
FIGURA 4.2. BER VS ORDEN DE ASIGNACIÓN DE ONTS EN EL ESPECTRO, PÉNDULO.	100
FIGURA 4.3. FACTOR Q VS ORDEN DE ASIGNACIÓN DE ONTS EN EL ESPECTRO, EXACT-FIT.	102
FIGURA 4.4. FACTOR Q VS ORDEN DE ASIGNACIÓN DE ONTS EN EL ESPECTRO, PÉNDULO.	102
FIGURA 4.5. JITTER VS ORDEN DE ASIGNACIÓN DE ONTS EN EL ESPECTRO, EXACT-FIT.	103
FIGURA 4.6. JITTER VS ORDEN DE ASIGNACIÓN DE ONTS EN EL ESPECTRO, PÉNDULO.	103
FIGURA 4.7. BER VS ORDEN DE ASIGNACIÓN DE ONTS EN EL ESPECTRO, EXACT-FIT.	104
FIGURA 4.8. BER VS ORDEN DE ASIGNACIÓN DE ONTS EN EL ESPECTRO, PÉNDULO.	105
FIGURA 4.9. FACTOR Q VS ORDEN DE ASIGNACIÓN DE ONTS EN EL ESPECTRO, EXACT-FIT.	106

FIGURA 4.10. FACTOR Q VS ORDEN DE ASIGNACIÓN DE ONTS EN EL ESPECTRO, PÉNDULO.	106
FIGURA 4.11. JITTER VS ORDEN DE ASIGNACIÓN DE ONTS EN EL ESPECTRO, EXACT-FIT.	107
FIGURA 4.12. JITTER VS ORDEN DE ASIGNACIÓN DE ONTS EN EL ESPECTRO, PÉNDULO.....	107

INDICES DE TABLAS

TABLA 1.1. COMPARACIÓN DE CWDM Y DWDM. ADAPTADA DE [10].	7
TABLA 1.2. TIPO DE RED FTTH VS DISTANCIA AL USUARIO. TOMADA DE [17].	17
TABLA 2.1. CUADRO COMPARATIVO DE LAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN.	48
TABLA 3.1. PARÁMETROS TÉCNICOS ESTABLECIDOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN Y SIMULACIÓN.	63
TABLA 3.2. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN PROPUESTOS.	71
TABLA 3.3. PARÁMETROS DE SIMULACIÓN.	73
TABLA 3.4. RESULTADOS PARÁMETROS INICIALES.	77
TABLA 4.1. RESULTADOS: 1,25 GBPS, 20 KM, 8 SLOTS - 4 ONTS.	97
TABLA 4.2. RESULTADOS: 2,5 GBPS, 20 KM, 8 SLOTS - 4 ONTS.	98
TABLA 4.3. RESULTADOS: 1,25 GBPS, 10 KM, 8 SLOTS - 4 ONTS.	98
TABLA 4.4. RESULTADOS: 2,5 GBPS, 10 KM, 8 SLOTS - 4 ONTS.	98
TABLA 4.5. RESULTADOS: 1,25 GBPS, 20 KM, 16 SLOTS - 8 ONTS.	98
TABLA 4.6. RESULTADOS: 2,5 GBPS, 20 KM, 16 SLOTS - 8 ONTS.	99
TABLA 4.7. RESULTADOS: 1,25 GBPS, 10 KM, 16 SLOTS - 8 ONTS.	99
TABLA 4.8. RESULTADOS: 2,5 GBPS, 10 KM, 16 SLOTS - 8 ONTS.	99
TABLA 4.9. ASIGNACIÓN DE ESPECTRO PARA 16 SLOTS.	110
TABLA 4.10. ASIGNACIÓN DE ESPECTRO PARA 8 SLOTS.	111

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>ECUACIÓN 1. FRECUENCIA PERMITIDA PARA LA SEPARACIÓN DE CANALES.....</i>	<i>21</i>
<i>ECUACIÓN 2. ANCHO DE RANURA (SW).</i>	<i>21</i>
<i>ECUACIÓN 3. FRECUENCIA CENTRAL.</i>	<i>21</i>
<i>ECUACIÓN 4. SEPARACIÓN ENTRE FRECUENCIAS CENTRALES.....</i>	<i>35</i>
<i>ECUACIÓN 5. FACTOR Q.....</i>	<i>50</i>
<i>ECUACIÓN 6. TASA DE ERROR BIT.....</i>	<i>51</i>
<i>ECUACIÓN 7. RELACIÓN SEÑAL A RUIDO.</i>	<i>51</i>

LISTA DE ACRÓNIMOS

AoD	<i>Architecture On Demand</i> - Arquitectura bajo demanda.
BER	<i>Bit Error Rate</i> - Tasa de Error de Bit.
BPM	<i>Business Process Management</i> - Gestión de Procesos de Negocio.
CBFF	<i>Class Based First Fit</i> - Clase de Primer Ajuste.
CDN	<i>Content Delivery Network</i> - Red de Distribución de Contenidos.
DWDM	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> - Multiplexación Densa por División de Longitud de Onda.
EPON	<i>Ethernet Passive Optical Network</i> - Red Óptica Pasiva para Redes Ethernet.
EON	<i>Elastic Optical Networks</i> - Redes Ópticas Elásticas.
FF	<i>First Fit</i> - Primer salto.
FTTH	<i>Fiber To The Home</i> - Fibra Hasta El Hogar.
FTTx	<i>Fiber To The x</i> - Fibra Hasta la x.
GNTT	<i>Research and Development Group for New Technologies in Telecommunications</i> - Grupo de Investigación y Desarrollo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones.
GPON	<i>Gigabit-Capable Passive Optical Networks</i> - Rede Óptica Pasiva con Capacidad de Gigabit.
ILP	<i>Integer Linear Programming</i> - Programación Lineal Entera.
ITU-T	<i>International Telecommunication Union – Telecommunication</i> - Unión Internacional de Telecomunicaciones, Telecomunicaciones.
LF	<i>Last Fit</i> - Último Ajuste.

NSFNeT	<i>National Science Foundation Network</i> - Red de la Fundación Nacional de Ciencia.
OBS	<i>Optical Burst Switching</i> - Conmutación Óptica de Ráfagas.
OCM	<i>Optical Channel Performance</i> - Desempeño del Canal Óptico.
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> - Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales.
OLT	<i>Optical Line Termination</i> - Terminal de Línea Óptica.
ONT	<i>Optical Network Terminal</i> - Terminal de Red Óptica.
ONU	<i>Optical Network Unit</i> - Unidad de Red Óptica.
OPM	<i>Optical Performance Monitoring</i> - Monitoreo de Desempeño Óptico.
OTN	<i>Optical Transport Network</i> - Red de Transporte Óptico.
PON	<i>Passive Optical Networks</i> - Redes Ópticas Pasivas.
QCC	<i>Quality Control Circles</i> - Círculos de Control de la Calidad.
QoS	<i>Quality of Service</i> - Calidad del Servicio.
RMLSA	<i>Routing, Modulation Level and Spectrum Allocation</i> - Enrutamiento, Nivel de Modulación y Asignación de Espectro.
RoF	<i>Radio Over Fiber</i> - Radio Sobre Fibra.
RSA	<i>Routing and Spectrum Allocation</i> - Enrutamiento y Asignación de Espectro.
RWA	<i>Routing and Wavelength Assignment</i> - Enrutamiento y Asignación de Longitud de Onda.
SIX SIGMA	<i>Process Improvement Methodology</i> - Metodología de Mejora de Procesos
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i> - Multiplexación por División de Longitud de Onda.

INTRODUCCIÓN

A medida que el espectro disponible en las redes ópticas ha venido aumentando su exigencia debido a los grandes flujos de datos que demanda el rápido desarrollo de nuevos servicios y aplicaciones en telecomunicaciones (video bajo demanda, *streaming*, almacenamiento en la nube, entre otros). Hoy en día, se observa como ante la necesidad de buscar nuevas soluciones para aumentar la capacidad y añadir mayor flexibilidad a las redes de transporte óptico actuales se han centrado las actividades de investigación en la búsqueda de soluciones en los segmentos de acceso y transporte ópticos especialmente en lo relacionado con técnicas que permitan un mejor uso del ancho de banda dentro del espectro óptico utilizable. Asimismo, se debe considerar el aumento del tráfico en las redes de comunicaciones ópticas debido principalmente a la presencia de nuevos servicios, los cuales, no solo llegan con mayores exigencias de ancho de banda, sino que además requieren procesos de asignación de espectro dinámico y flexible, aspecto que evidencia limitaciones en la infraestructura de las redes de acceso actuales [1]; por ello, se busca entonces definir una nueva infraestructura de acceso basado en el concepto de rejilla flexible o *Flexgrid*, siguiendo las características de las Redes Ópticas Elásticas EON (*Elastic Optical Networks*) como una forma de ofrecer un uso eficiente de los recursos ópticos disponibles [2].

Igualmente, las redes de acceso empleadas en la actualidad presentan deficiencias sobre todo debido a la rigidez con la que usan los recursos disponibles, principalmente el espectro óptico en la prestación de servicios de voz, datos y vídeo a los usuarios finales. Por lo tanto, se considera necesario proponer alternativas que permitan demostrar que el uso de las características EON en las redes de acceso puede lograr mejoras en el desempeño a nivel físico de dicha red al momento de prestar servicios Triplay [3]. El problema a solucionar requiere acudir a una red de acceso con fibra óptica hasta el hogar FTTH (*Fiber To The Home*) PON con enfoque EON (FTTH-EON) que permita mejorar la utilización de recursos en redes ópticas de acceso *Flexgrid*. Adicionalmente, se implementa un algoritmo de asignación de espectro óptico al sistema de la red FTTH-EON para el transporte de las señales a nivel físico en la prestación de servicios Triple play, con que se espera realizar un aporte significativo, porque con la culminación de este proyecto se tendría una referencia sobre la cual seguir trabajando en proyectos futuros, en concordancia con las demandas a nivel mundial de este tipo de tecnologías inalámbricas sobre fibra óptica. Además, se espera que distintas empresas del sector de Telecomunicaciones se interesen en los resultados del trabajo final con el fin de tomarlo como referencia a la hora de implementar los servicios de acceso dinámico en la prestación de servicios Triplay.

Por estos motivos se plantea la idea de analizar mediante simulación el desempeño a nivel físico de una red de acceso FTTH PON al incluir el enfoque EON para la prestación de servicios Triplay mediante la implementación de un algoritmo de asignación dinámica de espectro.

Con el fin de abordar los temas necesarios para el desarrollo de este trabajo de investigación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, se detalla a continuación el contenido en 4 capítulos distribuidos de la siguiente manera.

- Capítulo 1. Generalidades de las redes ópticas.

En este capítulo se presentan los conceptos teóricos básicos relacionados con redes ópticas tradicionales, redes ópticas elásticas, tratando de ofrecer al lector una contextualización que sirva de apoyo para entender los conceptos que se utilizarán durante el desarrollo de esta investigación.

- Capítulo 2. Algoritmos, herramientas de simulación y metodologías.

En este capítulo se caracterizan los algoritmos comunes para la asignación de recursos en redes ópticas elásticas. También, se describen las herramientas de software que permiten la simulación de redes y se escoge la más adecuada según sus características de funcionamiento. Finalmente, se presentan las metodologías de investigación y simulación seleccionadas.

- Capítulo 3. Desarrollo e implementación del entorno de simulación.

En este capítulo se detalla el funcionamiento de algunos algoritmos estudiados y describe la implementación de la red de prueba y el algoritmo diseñado para los casos de estudio, pertinentes para evaluar el desempeño de la red óptica elástica para cumplir con los objetivos del trabajo de grado.

- Capítulo 4. Análisis de resultados, conclusiones y trabajos futuros.

En este capítulo se estudian y analizan los resultados obtenidos en las simulaciones propuestas en el capítulo III, también se realizarán las respectivas conclusiones y, por último, se proponen algunos trabajos futuros para ampliar esta línea de investigación.

ABSTRACT

Due to the large data flows demanded by the rapid development of new services and applications in telecommunications (video on demand, streaming, cloud storage, among others), the spectrum available in optical networks has become increasingly demanding. Today, the need to find new solutions to increase capacity and add more flexibility to the existing optical transport networks has led to research activities focused on the search for solutions in the optical access and transport segments, mainly related to techniques that allow a better use of the bandwidth within the usable optical spectrum. In addition, it is necessary to consider the increase of traffic in optical communications networks caused mainly by the presence of new services, which not only come with higher bandwidth requirements, that also require dynamic and flexible spectrum allocation processes, an aspect that shows limitations in the infrastructure of current access networks [1]; For this reason, a new access infrastructure based on the concept of flexible grid or Flexgrid, following the characteristics of the Elastic Optical Networks (EON), will be defined as a way to offer an efficient use of the available optical resources [2].

In addition, the access networks used today have shortcomings mainly due to the inflexibility of the available resources, mostly the optical spectrum, in the provision of voice, data and video services to end users. For this reason, it is considered necessary to propose alternatives to demonstrate that the use of EON features in access networks can improve the physical performance of the network when supplying Triplay services [3]. In order to solve the problem, it is necessary to use a fiber to the home FTTH (Fiber To The Home) PON access network with an EON (FTTH-EON) focusing on improving resource utilization in Flexgrid optical access networks. In addition, an optical spectrum assignment algorithm is implemented to the FTTH-EON network system for the transport of signals at the physical level in the provision of Triple play services, which is expected to make a significant contribution, because with the completion of this project there would be a reference on which to continue working on future projects, in accordance with the worldwide demands of this type of wireless technologies over fiber optics. In addition, it is expected that different companies in the telecommunications sector will be interested in the results of the final work in order to take it as a reference when implementing dynamic access services providing Triplay services.

For these reasons, the idea of analyzing the physical performance of an FTTH PON access network by including the EON approach for the provision of Triplay services through the implementation of a dynamic spectrum allocation algorithm is proposed.

In order to cover the necessary topics for the development of this research work for the degree of Electronics and Telecommunications Engineer, the content is detailed below in 4 chapters distributed as follows.

- Chapter 1. Generalities of optical networks.

This chapter presents the basic theoretical concepts related to traditional optical networks, elastic optical networks, trying to offer the reader a contextualization that serves as support to understand the concepts that will be used during the development of this research.

- Chapter 2. Algorithms, simulation tools and methodologies.

This chapter characterizes the common algorithms for resource allocation in elastic optical networks. Also, the software tools that allow the simulation of networks are described and the most appropriate one is chosen according to its performance characteristics. Finally, the selected research and simulation methodologies are presented.

- Chapter 3. Development and implementation of the simulation environment.

This chapter details the operation of some of the algorithms studied and describes the implementation of the test network and the algorithm designed for the case studies, relevant to evaluate the performance of the elastic optical network to meet the objectives of the degree work.

- Chapter 4. Analysis of results, conclusions and future work.

In this chapter the results obtained in the simulations proposed in chapter III are studied and analyzed, the respective conclusions will also be made and, finally, some future works are proposed to extend this line of research.

CAPÍTULO I. Generalidades de las redes ópticas.

En este capítulo se detalla aspectos básicos de la teoría que enmarca a las redes ópticas tradicionales y redes ópticas elásticas, con el fin de ofrecer al lector un soporte para entender los conceptos que se aplican durante el desarrollo del trabajo de investigación.

Para la elaboración de este capítulo, se toman como referencia libros, artículos e investigaciones realizadas alrededor de todo el mundo enmarcadas en los diferentes temas tratados en el presente trabajo, con el fin de dar un soporte científico y actualizado al trabajo de investigación.

1.1. Aspectos generales de las redes ópticas.

Debido al desarrollo y avances tecnológicos en las diferentes áreas de las telecomunicaciones, y en algunas tecnologías como la fibra óptica, las cuales se enfocan en proponer soluciones que satisfagan las demandas de velocidad y ancho de banda que continuamente están en aumento. Existe una clara necesidad de cómo aprovechar al máximo la capacidad de las redes ópticas, ya que sus propiedades permiten soportar los actuales requerimientos de conexión.

En las siguientes secciones serán tratados algunos aspectos generales sobre los tipos y el funcionamiento de las redes ópticas tradicionales.

1.1.1. Tecnología WDM.

Debido al aumento del tráfico en las redes de comunicaciones ópticas y principalmente a la presencia de nuevos servicios, usuarios y las aplicaciones, los cuales llegan con mayores exigencias debido al incremento de la cantidad de información que debe transmitirse ha hecho necesaria la evolución de las redes de transporte. Una red de transporte óptico u OTN (*Optical Transport Network*), es una red de datos que hace uso de la tecnología óptica permitiendo enviar la información sobre enlaces de fibra óptica [4].

La necesidad de ampliar la capacidad de las OTN debido a la creciente demanda del envío de más información sobre el mismo hilo de fibra ha requerido la implementación de múltiples técnicas y tecnologías de multiplexación, entre ellas WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). La cual es una técnica que permite usar eficientemente la capacidad que ofrece la fibra óptica, transmitiendo la información sobre múltiples longitudes de ondas en una misma fibra, es decir; consiste en multiplexar dos o más señales ópticas mediante diferentes portadoras sobre un mismo hilo de fibra, utilizando un multiplexor que combina las señales y un demultiplexor encargado de separar las señales en su

respectiva longitud de onda original [5]. El funcionamiento de WDM se ilustra mejor en la Figura 1.1. [6].

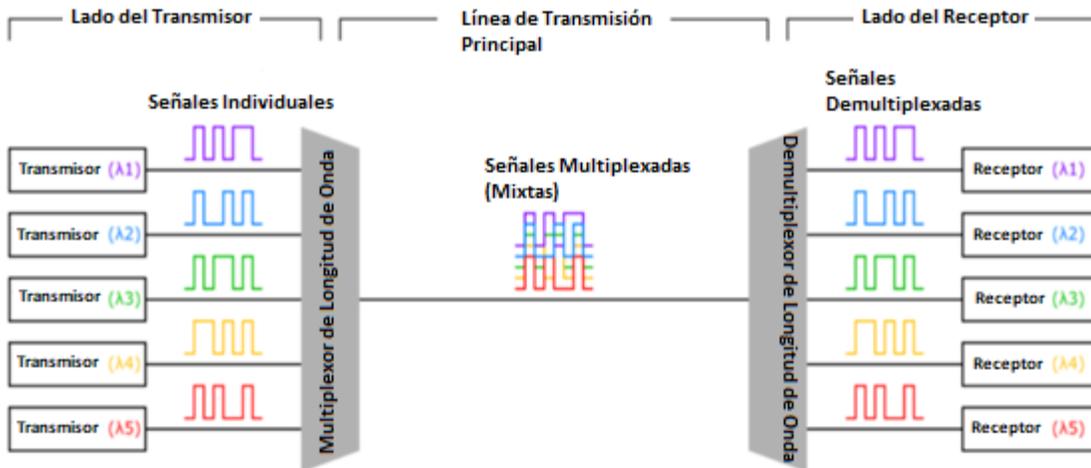


Figura 1.1. Esquema básico de un sistema basado en WDM. Adaptada de [6].

En WDM se consideran dos tipos de sistemas: Multiplexación por división de longitud de onda amplia CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*) y multiplexación por división de longitud de onda densa DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), siendo soluciones prácticas que satisfacen el continuo aumento en la demanda de ancho de banda [7] [8] [9]. En la figura 1.2, se presentan las ventanas de transmisión y los rangos de las bandas de operación para la transmisión en la fibra óptica. En la tabla 1.1, se presentan las características y diferencias más relevantes de los sistemas CWDM y DWDM respectivamente, Los cuales se detallan a continuación.

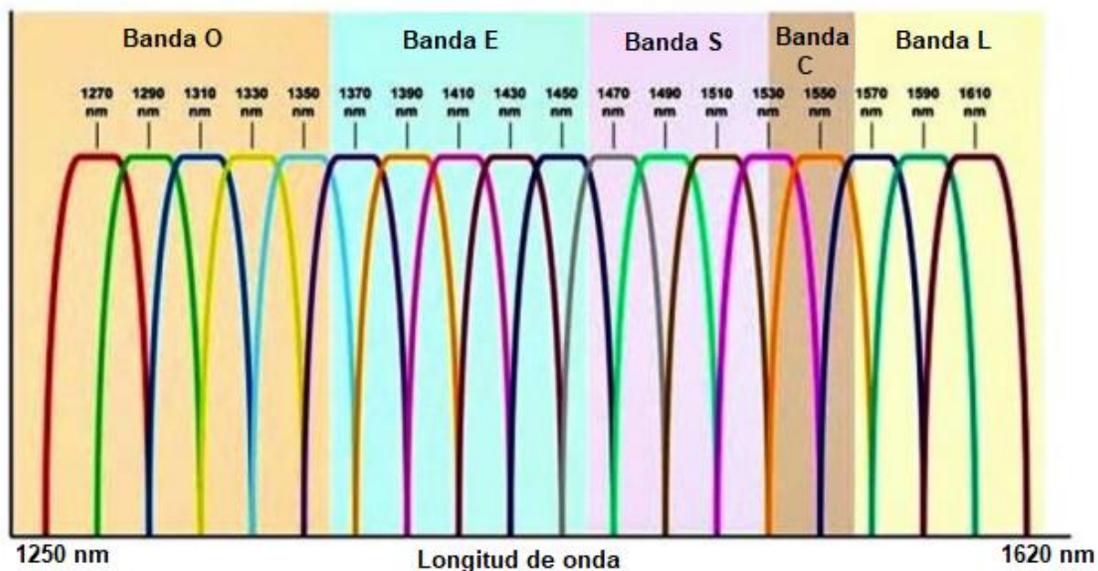


Figura 1.2. Ventanas y rangos de operación en redes ópticas. Adaptada de [10].

CARACTERISTICAS	CWDM	DWDM MAN/WAN	DWDM LARGO ALCANCE
Espaciamiento de los canales	20 nm (2500 Ghz)	0.8 nm (100 Ghz)	0,4 nm (50 Ghz)
Bandas de operación	O, E, S, C, L	C, L	C, L, S
Canales por fibra	De 4 a 16	De 32 a 80	De 80 a 160
Capacidad por canal	2.5 Gb/s	10 Gb/s	10 - 40 Gb/s
Distancias típicas	Menor o igual a 80 Km	81 Km - 999 Km	Mayor o igual a 1000 Km
Costos	Bajo	Medio	Alto

Tabla 1.1. Comparación de CWDM Y DWDM. Adaptada de [10].

1.1.2. Sistemas CWDM.

La rápida evolución de los sistemas ópticos permitió ir desde la multiplexación de unos pocos canales ópticos hasta el envío de decenas de canales sobre el mismo hilo, pasando por los sistemas CWDM (*Coarse Wavelength División Multiplexing*), permite enviar sobre una misma fibra hasta máximo 18 canales; presenta una mayor separación entre canales que DWDM, permitiendo así el uso de equipos de menor precisión, es decir, multiplexores/demultiplexores de bajo costo, además de contar con anchos de banda y bandas de guarda suficientes. Esta técnica opera en el rango de 1270 a 1610 nm y utiliza láseres con mayor ancho espectral y sin estabilización en frecuencia. CWDM es una tecnología más sencilla que se adapta a los requerimientos que presentan algunas redes empresariales y metropolitanas de corta distancia (distancias no superiores a 80 Km) que no necesitan tasas de transmisión tan altas como las que ofrece la tecnología DWDM [8] [9] [10].

1.1.3. Sistemas DWDM.

En DWDM (*Dense Wavelength División Multiplexing*), cuenta con capacidades y anchos de banda mayores a los de CWDM, debido a que DWDM es capaz de transmitir información en múltiples longitudes de onda a diferentes velocidades de datos y por largas distancias que permite amplificación y posterior transmisión de forma simultánea. Las redes DWDM funcionan asignando lambdas en la ventana C y L de transmisión del espectro óptico, cuentan con 4 posibles espaciamentos de 100 GHz, 50 GHz, 25 GHz y 12,5 GHz que se eligen de acuerdo a los requerimientos, estos pueden tener 40, 80 o 160 canales ópticos. Además, este sistema permite transmitir a altas velocidades y a muy largas distancias sin disminuir el número de usuarios y para múltiples servicios [7] [8] [10].

Este sistema ha contribuido al desarrollo de las redes de datos de telecomunicaciones a nivel global, debido a su capacidad para transmitir grandes volúmenes de información que soporta todos los protocolos de datos, pudiendo

así transmitir servicios de como voz, datos o videos, ya sea en tiempo real o no, su alcance respecto a la distancia y su soporte multiprotocolo. Esta última característica permite que la red sea heterogénea frente a los servicios y éstos puedan transmitirse sin importar su tipo [9] [11].

1.2. Redes ópticas pasivas – Passive Optical Networks (PON).

Una red óptica pasiva PON, es una red de acceso óptico punto a multipunto (ver figura 1.3), la cual permite eliminar todos los elementos activos en la ruta de la señal desde el servidor y el cliente, introduciendo en su lugar componentes ópticos pasivos para guiar el tráfico por la red, lo que genera una reducción en costos operacionales. En esta red, todas las transmisiones se realizan entre un Terminal de Línea Óptica (OLT, Optical Line Termination) y una Unidad de Red Óptica (ONU, Optical Network Unit) principalmente la red presenta una división óptica de la señal a través de un divisor óptico llamado (Splitter) (por ejemplo, con una entrada y 16 salidas) y combinadores. La OLT se ubica en la Oficina Central (CO, Central Office) y conecta la red de acceso ópticas con Redes de Área Metropolitana (MAN, Metropolitan Area Network) y Redes de Área Amplia (WAN, Wide Area Network).

La transmisión se realiza entonces entre la OLT y la ONU que se comunican a través del divisor, cuya función depende de si el canal es ascendente o descendente. La ONU recibe la señal óptica y realiza la conversión de la señal óptico/eléctrica para ofrecer servicios banda ancha de voz, datos y video a los usuarios finales; este equipo utiliza diferentes longitudes de onda siendo capaz de transmitir y recibir simultáneamente por un solo hilo de fibra según la tecnología de acceso utilizada: Fibra Hasta la Acera (FTTC, Fiber To The Curb), Fibra Hasta el Edificio (FTTB, Fiber To The Building), Fibra Hasta el Vecindario (FTTN, Fiber To The Neighborhood). Se denomina Terminal de Red Óptico (ONT, Optical Network Terminal) si se ubica en la premisa del usuario, es decir, Fibra Hasta el Hogar (FTTH, Fiber To The Home). En realidad, ONT es lo mismo que ONU en esencia, ONT es un término ITU-T, mientras que ONU es un término IEEE, pero ambos se refieren al equipo del lado del usuario en el sistema GPON. En definitiva, la red PON trabaja utilizando Splitters (divisores) ópticos pasivos. [12]

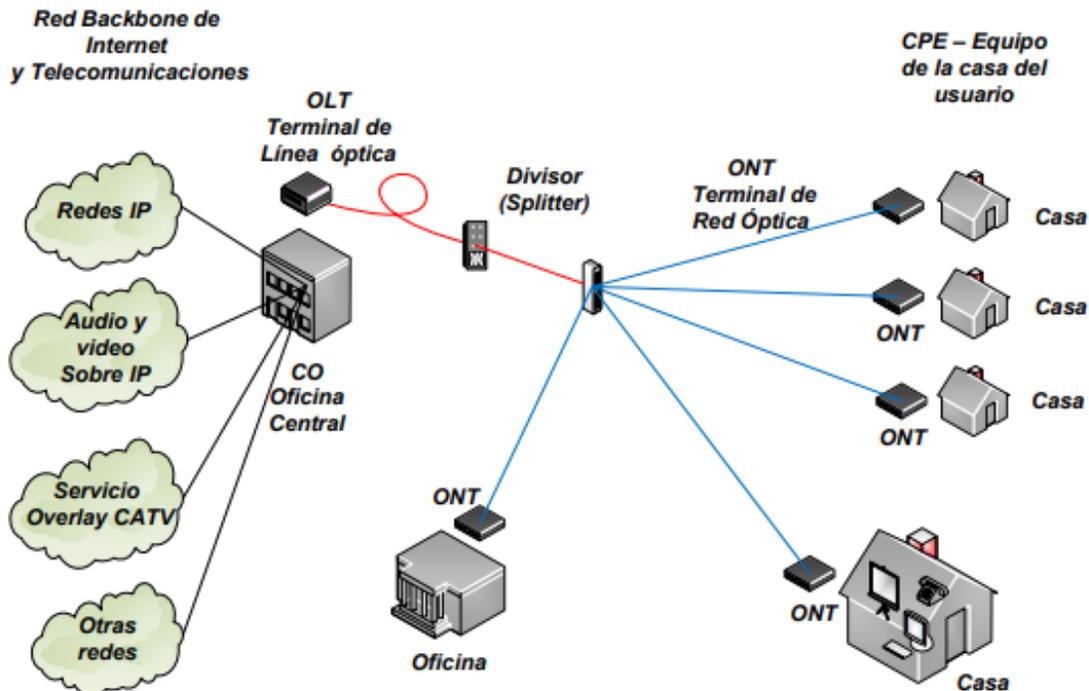


Figura 1.3. Red óptica pasiva (PON). Tomada de [12].

Existen varios estándares de la ITU para redes ópticas pasivas y protocolos que muestran la evolución de estas redes, las cuales se describen a continuación. La primera evolución fue adoptada en el año 2001, mediante el desarrollo de los trabajos de Red de Acceso de Servicio Completo (FSAN, Full Service Access Network) también conocida como APON basada en el protocolo Modo de Transferencia Asíncrona (ATM, Asynchronous Transfer Mode) denominándose APON (ATM-PON, Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network), la cual posteriormente evolucionó en la denominada Red Óptica Pasiva de Banda Ancha (BPON, Broadband Passive Optical Network) la cual se convertiría en referencia para presentar su evolución a el estándar GPON para más adelante evolucionar a la Red Óptica Pasiva Ethernet (EPON, Ethernet Passive Optical Network) y la Red Óptica Pasiva con capacidad Gigabit Ethernet (GEPON, Gigabit Ethernet Ethernet Passive Optical Network), las cuales son soluciones para las redes PON exclusivamente para el desarrollo bajo la tecnología de acceso Ethernet.[12]

1.2.1 Redes ópticas pasivas con capacidad Gigabit – Passive Optical Networks (GPON).

La ITU-T define la serie de estándares G.984.x, más específicamente en las recomendaciones G.984.1 a G.984.4, donde se describen las características generales de la red óptica pasiva Gigabit (GPON) la cual tiene una capacidad

mejorada en comparación con APON y BPON debido a que soporta el transporte de información mediante ATM e incluso Ethernet, por medio del Método de Encapsulamiento GPON (GEM, GPON Encapsulating Method), el cual se encarga de encapsular el tráfico Ethernet y el tráfico ATM de un determinado enlace. Estas características exponen las especificaciones desde la capa física (PMD, Physical Medium Dependent), capa de transmisión (GTC, Transmission Convergence); y finalmente describe la ONU y las especificaciones de la interfaz de control y gestión (OMCI, ONT Management and Control Interface).

En general la red GPON de acuerdo con el estándar de la ITU-T describe una red de acceso óptica flexible, escalable con soporte global multiservicios y soporte para varias tasas de transferencia, incluyendo tráfico simétrico de 622 Mbps, a 2.5 Gbps y, asimétrico de 2.5Gbps en sentido descendente y 1.25 Gbps en sentido ascendente. Alcance máximo de hasta 60 Km incluida una distancia diferencial de 20 Km entre las ONTs, y una tasa de división máxima en los dispositivos Splitter de 1:64, con rangos de longitudes de onda desde 1480 a 1500 nm para transmisión en el enlace Downlink y de 1260 a 1360 nm en el enlace Uplink, y capaz de soportar grandes requerimientos de anchos de banda para la prestación de servicios [12] [13].

Topologías.

Dentro de las soluciones FTTH existen dos topologías a considerar, punto a punto (P2P) la cual es una fibra dedicada desde la oficina central hasta cada usuario; y punto a multipunto (P2MP), donde la fibra es común para un conjunto de usuarios. Si bien la topología es quien distribuye o conecta una red para comunicar entre sí sus elementos. Estas arquitecturas son de la familia de las redes ópticas pasivas PON y pueden utilizar tres tipos de topologías: Punto a Punto y Punto a Multipunto entre otras la cuales se describen a continuación. Además de estas topologías se tiene otras configuraciones como lo son: árbol (tree), bus (Branch), estrella (star), anillo y malla (mesh).

Topología punto a punto (EP2P).

Como se mencionó anteriormente la topología P2P está compuesta por una fibra dispuesta desde la oficina central hasta el usuario, la cual carece de divisores ópticos en la red. Esta red es una solución que se implementa típicamente en una red ethernet punto a punto (EP2P), donde la fibra es común para un conjunto de X usuarios, la cual requiere instalar N fibras en el canal de comunicación dependiendo de la distancia a cubrir. No obstante, se requiere de la ubicación de un conector eléctrico – óptico en la OLT y ONT, respectivamente, permitiendo velocidades simétricas entre la central y el usuario.

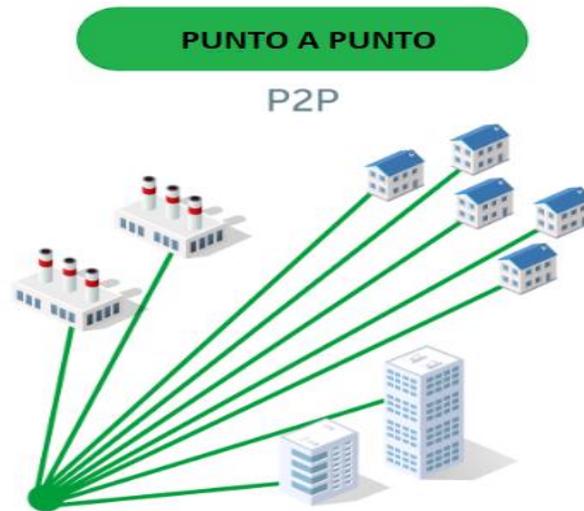


Figura 4.4. Topología punto a punto. Tomada de [49].

Topología Punto a Multipunto (P2MP).

La topología (P2MP), cuenta con una capacidad de gestionar el tráfico de acuerdo con las necesidades de los X usuarios, para lo cual se requiere instalación de una fibra de acuerdo con el tramo a cubrir, aparte, se requiere del uso de conector electro-óptico en la ONT y el en la OLT para el total requerido de conectores. La ventaja de esta topología, es que el splitter óptico pasivo, que es el elemento intermedio entre la ONT y la OLT, no requiere de una fuente eléctrica de alimentación. De aquí su nombre de una red óptica pasiva o PON. La cual es de menor costo y además incorpora en sus estándares a las redes ópticas pasivas Gigabit (GPON) y las redes ópticas pasivas Ethernet (EPON) [12].

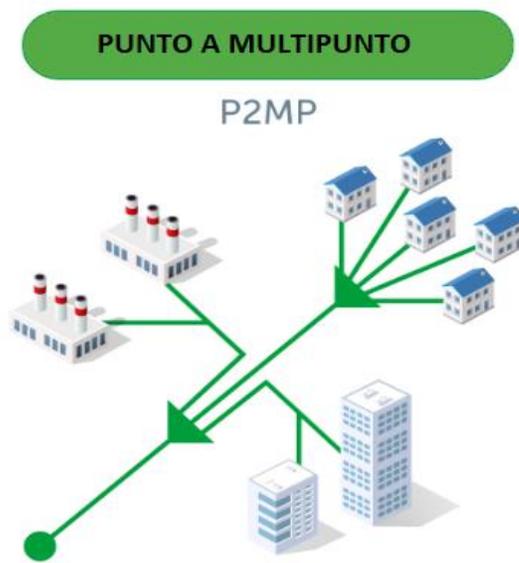


Figura 5.5. Topología punto a multipunto. Tomada de [49].

Topología en bus.

Esta topología existe en un único canal de comunicaciones que comparten los diferentes dispositivos de la red, la cual utiliza un solo cable y en sus extremos están acoplados con un denominado terminador, con el cual se puede indicar que no quedan más equipos en el extremo, de esta manera se cierra el bus por medio del acople de impedancias.

Entre las ventajas está la fácil implementación y su simplicidad, sin embargo, también cuenta con desventajas entre las cuales están, el límite máximo de equipos conectados, degradación de la señal, difícil reconfiguración, limitación en la longitud de cable, elevada colisión de mensajes, alta tasa de pérdida en la transmisión y necesita de un mayor espacio [12].

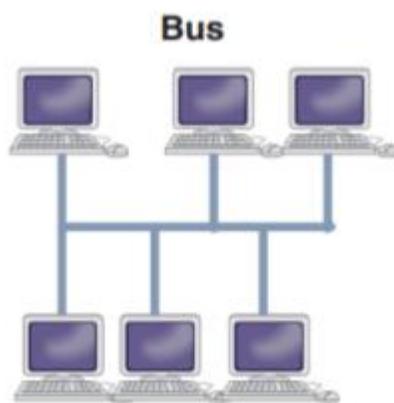


Figura 6.6. Topología en bus. Tomada de [12].

Topología estrella.

La topología en estrella se caracteriza por la conexión de todas las estaciones a un punto central, permitiendo realizar así todas las funciones de distribución, conmutación y control.

Dentro de sus ventajas están los medios para resolver problemas, por ejemplo, si un terminal falla, no influye en el resto de la red; es muy fácil de escalar; es fácil prevenir conflictos (excepto en el caso de los Hub), por lo cual su costo de mantenimiento es aceptable. Sin embargo, existen inconvenientes en la red por desconexión en caso de falla de los nodos, lo cual exige que el sistema necesite protección de alimentación ininterrumpida [12].

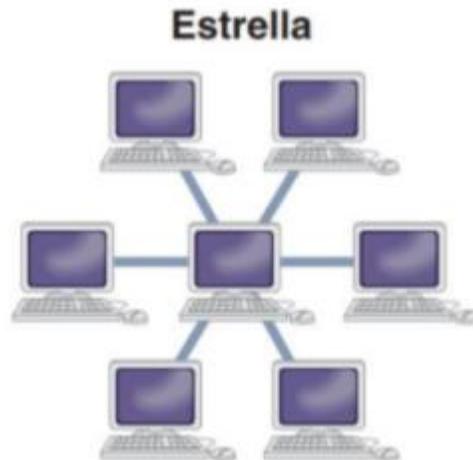


Figura 7.7. Topología en estrella. Tomada de [12].

Topología en Árbol.

La topología en árbol posee una estructura jerárquica, es decir, si un nodo falla, deja a un grupo de terminales sin conexión. Esta topología se usa mucho en redes de telefonía con centralitas locales, municipales, regionales, estatales, el protocolo Ethernet se usa comúnmente en este tipo de topología.

Entre sus ventajas se encuentran la facilidad y posibilidad de expandir la red, la división de toda la red en segmentos como red en estrella, y la facilidad en la gestión, mantenimiento, detección y corrección de errores. Entre sus desventajas se encuentra, al tener una estructura básica, depende en gran medida del cable de bus principal, es decir, si este se rompe, toda la red queda impedida [12].

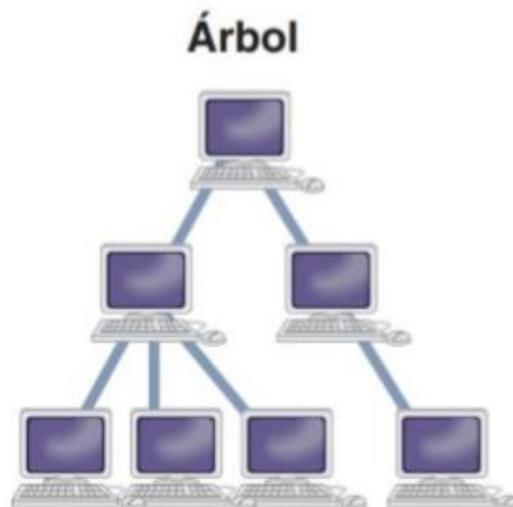


Figura 8.8. Topología en árbol. Tomada de [12].

Topología en anillo.

En esta topología, la característica principal se debe a la conexión de cada estación la cual se encuentra conectada a la siguiente y la última a la primera cerrando el círculo. En la topología en anillo cada nodo tiene un receptor y un transmisor que hacen la función de repetidor hacia el siguiente equipo y presenta menos colisiones por los algoritmos de paso de testigo.

Tiene las mismas ventajas e inconvenientes que la topología en bus siendo el más preocupante por su fragilidad, esto debido a que, si falla un terminal, la red no funcionará. por otro parte también existe la topología de doble anillo para que la comunicación sea bidireccional, creando una gran tolerancia a fallos [12].

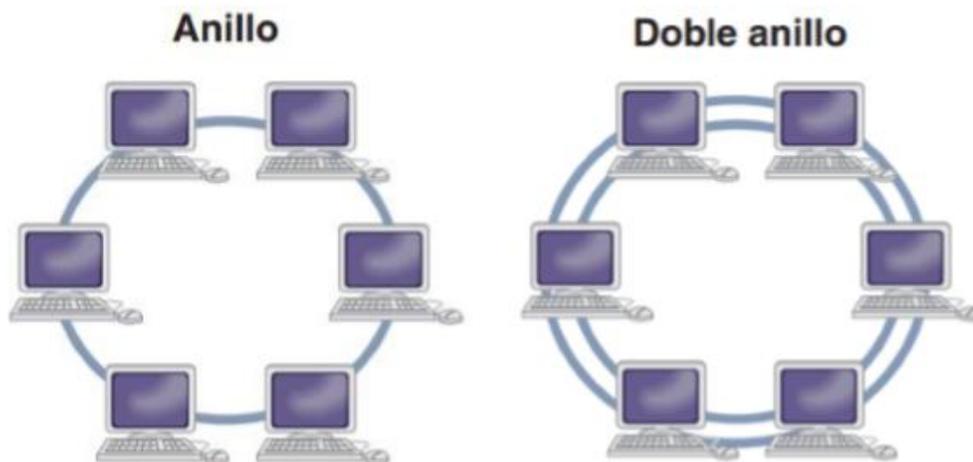


Figura 9.9. Topología en anillo y doble anillo. Tomada de [12].

1.3. Tecnología FTTx.

La Fibra Óptica ha demostrado ser la tecnología más importante para las redes de telecomunicaciones de próxima generación, proporcionando servicios que demandan alta capacidad, ya que permite conectividad de alta o ultra alta velocidad en comparación con algunas tecnologías de red de acceso fijas, además que brinda una mayor duración de vida útil, inmunidad frente a interferencias electromagnéticas, flexibilidad y escalabilidad en la red, entre otras ventajas.

1.3.1. Arquitectura FTTx.

Fibra a la x (FTTx) es un término genérico para cualquier banda ancha utilizando la arquitectura de red de fibra óptica. El acrónimo FTTx es conocido ampliamente como *Fiber-to-the-x*, donde x puede denotar distintos escenarios o configuraciones desplegadas denotando los diferentes destinos del cableado de fibra óptica. Esta tecnología de acceso se basa principalmente en redes ópticas pasivas (PON, *Passive Optical Network*), como se observa en la figura 1.10. Las redes ópticas pasivas son redes punto a multipunto que no poseen elementos activos en la red de distribución óptica, en su lugar utilizan dispositivos de carácter pasivo y otros para distribuir la señal proveniente del proveedor del servicio hacia los usuarios finales.

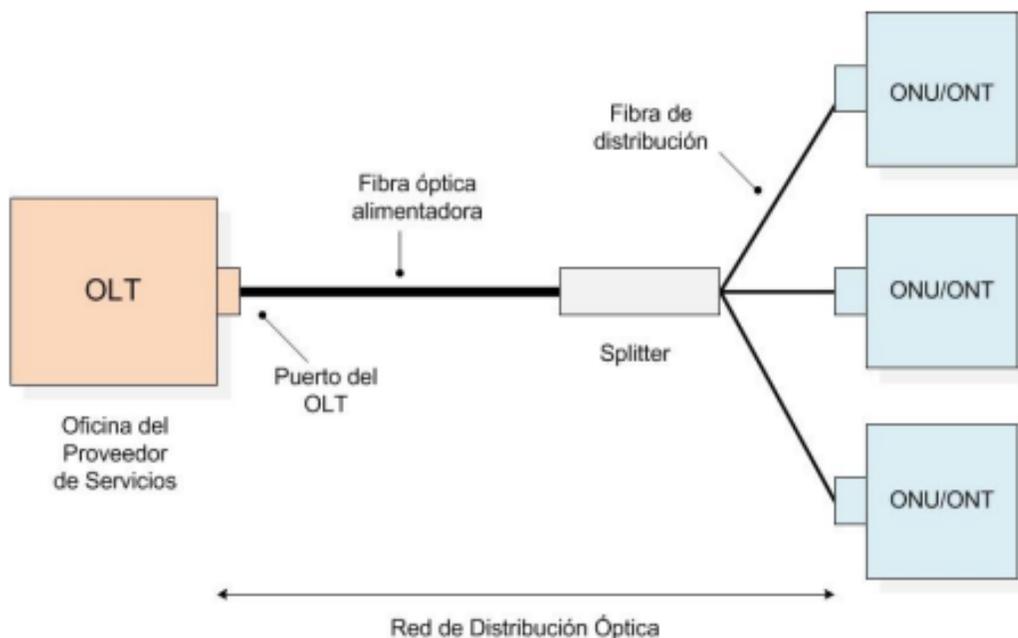


Figura 10.10. Red de distribución óptica. Tomada de [14].

Según [15], Se pueden distinguir distintos tipos de redes de la familia de FTTx dependiendo de la distancia entre el tramo de fibra y el usuario final, tal y como se indica en la Figura 1.11.

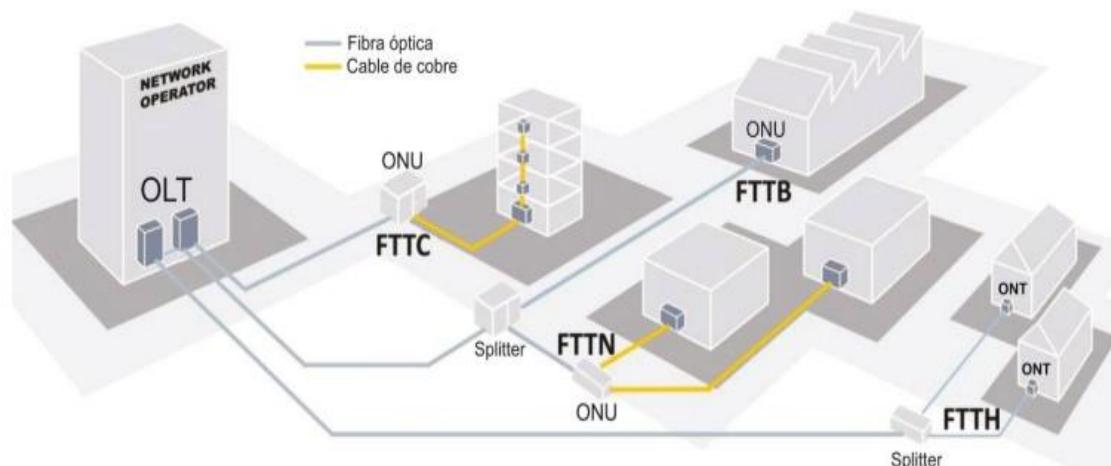


Figura 11.11. Clases de escenarios de FTTX. Tomada de [16]

- **Fibra Hasta el Hogar FTTH (*Fiber To The Home*).**

En este escenario, conocido como fibra hasta el hogar, enmarcada dentro de las tecnologías FTTx, se basa en la utilización de fibra óptica desde la oficina del proveedor hasta el hogar, esta tecnología permite transmitir servicios banda ancha y servicios avanzados, como el Triple Play [17].

- **Fibra Hasta la Acera FTTC (*Fiber To The Curb*).**

En este escenario, conocido como fibra hasta la acera la fibra óptica llega hasta la ONU ubicada a menos de 300 m del hogar de los suscriptores, acortando la distancia que viaja la conexión mediante líneas existentes como por ejemplo la de cobre, por lo cual tiene menor costo en su implementación [17].

- **Fibra Hasta el Edificio FTTB (*Fiber To The Building*).**

En este escenario, conocido como fibra hasta el edificio o también llamada fibra hasta el sótano FTTB, se caracteriza por llevar la fibra hasta la infraestructura del edificio y utilizar la red de distribución del mismo para distribuir los servicios al usuario final, generalmente su prestación de comunicación de fibra óptica se aplica a propiedades donde viven múltiples usuarios o espacios grandes de trabajo [17].

- **Fibra Hasta el Vecindario FTTN (*Fiber To The Neighborhood*).**

En este escenario, también llamada fibra para el barrio o fibra hasta el armario (FTTCab), permite distribuir la información desde la central hasta un armario o gabinete que sirve a un barrio o zona residencial, la cual utiliza la infraestructura existente y su velocidad dependerá de la misma infraestructura. Normalmente el área de cobertura por el gabinete es por lo general menos de 1.500m de radio y puede contener varios cientos de clientes. Sin embargo, si el gabinete atiende un área de menos de 300 m de radio, la arquitectura que se suele llamar es fibra hasta la acera [17].

Tipo de Red FTTX	Distancia al usuario
FTTN (Fiber-to-the-node):	El tramo de fibra termina en una cabina situada en la calle de entre 1,5 a 3 km del usuario
FTTC (Fiber-to-the-curb):	La fibra llega hasta la acera. En este caso la cabina se encuentra más próxima al usuario, a una distancia entre 300 y 600 metros.
FTTB (Fiber-to-the-building o Fiber-to-the-basement):	El proveedor de servicio llega hasta el cuarto de distribución del edificio. A partir de este punto se llega hasta el usuario normalmente utilizando par de cobre.
FTTH (Fiber-to-the-home):	La fibra llega al interior o a la fachada de la vivienda.

Tabla 1.2. Tipo de red FTTX vs distancia al usuario. Tomada de [17].

Es importante decir que hay otros tipos de configuraciones algo menos utilizadas, pues no están estandarizadas: las cuales son de acuerdo con [17]

- **FTTCab (*Fiber-To-The-Cabinet*):** fibra hasta el armario.
- **FTTP (*Fiber-To-The-Premises*):** Utilizada de dos formas distintas:
 1. Término genérico para designar las arquitecturas FTTH y FTTB.
 2. cuando la red de fibra incluye tanto viviendas como pequeños negocios.
- **FTTO (*Fiber-To-The-Office*):** fibra hasta la oficina.
- **FTTU (*Fiber-To-The-User*):** hasta el usuario.

Normalmente los servicios se transmiten en tecnologías como información correspondiente a estos servicios [18]; se ubica normalmente en el gabinete

(FTTC, *Fiber To The Curve*) o en el edificio (FTTB, *Fiber To The Building*) y se denomina Terminal de Red Óptica (ONT, *Optical Network Terminal*) si se ubica en la premisa del usuario (FTTH). En realidad, ONT es lo mismo que ONU (*Optical Network Unit*) en esencia, ONT es un término ITU-T, mientras que ONU es un término IEEE, pero ambos se refieren al equipo del lado del usuario en el sistema GPON, ver figura 1.12 [19].



Figura 12.12. ONT HG847H. Tomada de [12].

1.4. Generalidades redes ópticas elásticas - Elastic Optical Networks.

Si bien las redes tradicionales basadas en WDM permitió maximizar el uso del espectro óptico con conexiones de gran capacidad, no concede el uso más eficiente del mismo, ya que la naturaleza de este sistema introduce rigidez espectral incapaz de adaptarse a los nuevos requerimientos de la red, por lo tanto, restringe la capacidad de adaptación a las necesidades reales de transmisión y eleva el costo de implementación. Han sido propuestos sistemas basados en WDM con diferentes esquemas de modulación, brindando así cierta elasticidad a la red, pero sin ser esta una solución definitiva al problema, se ha propuesto la arquitectura de redes ópticas elásticas o flexibles (*Flexgrid*) las cuales se perfilan como una alternativa interesante y prometedora para solucionar problemas como el uso eficiente del espectro del que dispone la red [20].

El tráfico en las redes de datos por fibra óptica ha tenido un crecimiento exponencial debido a la creciente demanda de información por parte de los usuarios finales, en este contexto las actividades de investigación se han enfocado en la evolución de las redes basadas en multiplexación por división de longitud de onda WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) sobre rejilla fija hacia

una nueva rejilla flexible. Dicho enfoque ha sido denominado *Flexgrid* o Redes Ópticas Elásticas EON (*Elastic Optical Networks*), buscando mayores velocidades de datos, menor consumo energético y mayor flexibilidad en la asignación espectral [20].

1.4.1. Conceptos básicos de una red óptica elástica.

Una red óptica elástica también conocida como EON (*Elastic Optical Network*) o *Flexgrid*, se define como una red de transporte óptico OTN (*Optical Transport Network*), que tiene la capacidad de adaptar el espectro disponible a los requerimientos de ancho de banda del tráfico transportado por el usuario [20]. Las redes ópticas elásticas buscan evitar el mal uso de recursos adaptando dinámicamente las características de la red, al estado de uso de esta en cada instante, por lo que si, por ejemplo, un servicio solicita recursos para ser transmitido, le sea asignada la cantidad de ancho de banda real que demanda y no todo el espectro del que dispone el canal, lo que supone un ahorro real del espectro óptico. Las EON permiten una mayor flexibilidad y adaptabilidad sobre algunos otros parámetros de red como la distribución de longitudes de onda, ancho de banda, formatos de modulación, tasas de bit, entre otros, a medida que varían las condiciones de tráfico, la cantidad de usuarios y demás factores que afectan el comportamiento de la red, procurando siempre mantener un alto grado de la calidad de la transmisión o QoT (*Quality of Transmission*) [21]. La arquitectura de una red óptica elástica ver figura 1.13, se compone de conmutadores ópticos (WXC) en la red central, y transpondedores de ancho de banda variable (BVT) en el borde de la red basados en Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [3] [22] [23].

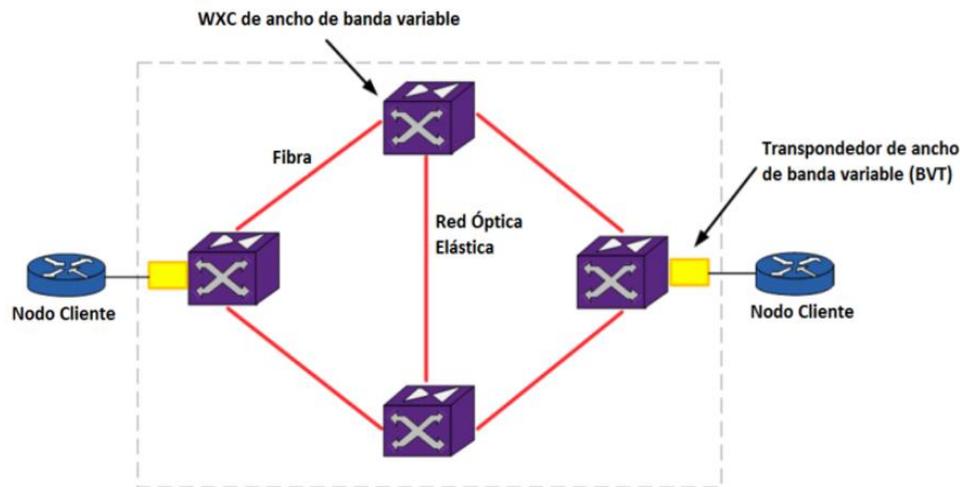


Figura 13.13. Arquitectura de una EON, Tomada de [3].

En las redes ópticas de telecomunicaciones se presentan dos cambios fundamentales que deben realizarse en las redes actuales para lograr la elasticidad necesaria y poder adaptarse a los diferentes requerimientos de tráfico conocido como sustitución de rejilla fija por una rejilla de espectro flexible y el enrutamiento (*Routing*) y asignación de espectro (*Spectrum Assignment*) denominados de manera integral como RSA (*Routing and Spectrum Assignment*) no son tema nuevo en el campo de las redes ópticas, pero cada vez tienen más relevancia en la búsqueda de la mejor solución posible.

- **Especificación de rejilla de espectro flexible.**

Como se mencionó anteriormente para lograr obtener una red EON es necesaria la sustitución de la rejilla de espectro fija por una rejilla de espectro “flexible”. Si bien las redes WDM tradicionales trabajan sobre la rejilla fija especificada por la ITU-T en la norma G.694.1 de 2002 la cual dispone de canales fijos con una separación de 100 GHz, 50 GHz y 25 GHz como se muestra en la Figura 1.14. Razón por la cual, la ITU-T trabaja en la revisión de la norma específicamente en la división “flexible” del espectro denominado *Flexgrid* [24]. En esta nueva rejilla (ver Figura 1.15) el espectro óptico de la banda C (1530-1565 nm) es dividido en pequeñas ranuras de 6,25 GHz llamado (*Slices*), de forma que dos de ellas conforman un slot de 12,5 GHz al que se le asigna una frecuencia central o CF (*Central Frequency*) [20].

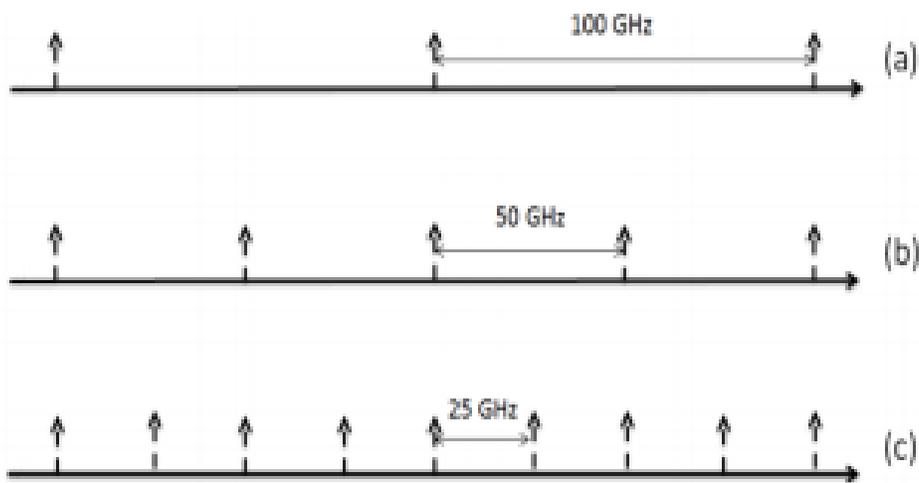


Figura 14.14. Rejilla WDM esquema asignación recursos, (a). Canales separados 100GHz, (b). Canales separados 50 GHz y (c). Canales separados 25 GHz. Tomada de [24].

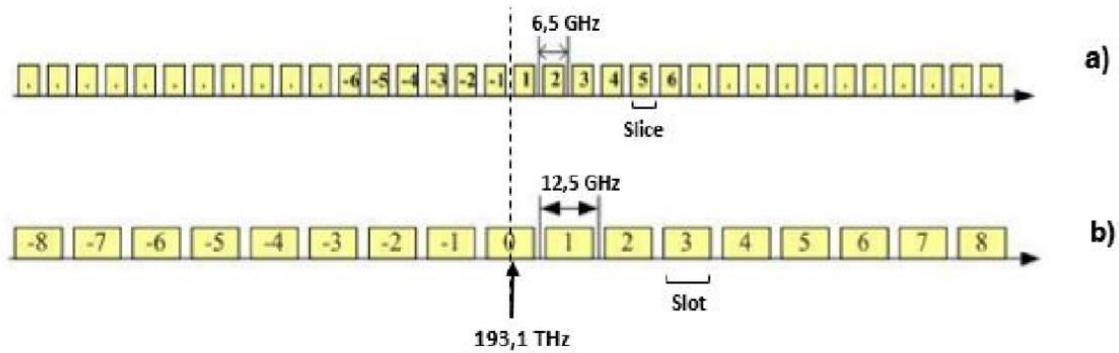


Figura 15.15. Rejilla flexible, (a) Conformación de slices y (b). Conformación de slots. Adaptada de [21].

Teniendo en cuenta lo anterior, la frecuencia central (en THz) para la separación de canales de 6,25 GHz en una fibra, tomando como referencia la frecuencia de 193,1 THz, está dada por la Ecuación (1).

$$CF = 193.1 [THz] + 0.00625 [THz] * n$$

Ecuación 1. Frecuencia permitida para la separación de canales.

Donde n es un número entero positivo o negativo incluido el cero, el cual representa el índice central en una porción de espectro asignada a una conexión y tiene un valor mínimo de -246 (índice de la frecuencia correspondiente a 1565 nm) y un valor máximo de 455 (índice de la frecuencia correspondiente a 1530 nm) por lo tanto lo anterior representa el índice de la frecuencia al inicio o fin de cada segmento [10], [24].

Dado que en las EON las porciones de espectro se asignan de acuerdo a los requerimientos del usuario, también es necesario introducir el concepto de ancho de ranura o segmento SW (*Slot Width*), qué representa el número de segmentos o slot de la frecuencia FS (*Frequency Slots*) asignados a la conexión, multiplicados por el ancho de banda de cada slot que equivale a 12.5 GHz [20]. Por lo anterior el ancho del segmento viene dado por la Ecuación (2).

$$Slot\ Width = 12,5 [GHz] * m$$

Ecuación 2. Ancho de ranura (SW).

Donde m es un número entero positivo, que representa el número de *slots* de frecuencia necesarios para satisfacer con el ancho de banda requerido en el sistema de una conexión.

De acuerdo con lo anterior, un canal en una EON se define por su frecuencia central y su respectivo ancho de banda que corresponde a la diferencia entre su frecuencia final y su frecuencia inicial. Como se expresa en la ecuación (3).

$$frecuencia\ central = f_i + 0.00625 [THz] * m$$

Ecuación 3. Frecuencia central.

En la Figura 1.16, se presenta un ejemplo de dos conexiones ópticas con diferentes requerimientos, con el fin de facilitar la comprensión de los conceptos anteriormente mencionados; de este modo vemos que el espectro óptico disponible se divide en segmentos o *slots* de 12.5 GHz con dos conexiones establecidas. En la conexión uno se tiene su frecuencia central en el índice -5 con un valor de 193.06875 THz y un ancho de banda de 37.5 GHz o 3 *slots* de frecuencia; y la conexión dos ubica su frecuencia central en el índice 4 con un valor de 193.125 THz y un ancho de banda de 50 GHz o 4 *slots* de frecuencia. Por lo anterior, con los conceptos de (frecuencia central y ancho de ranura), es posible definir un canal en función de m y n .

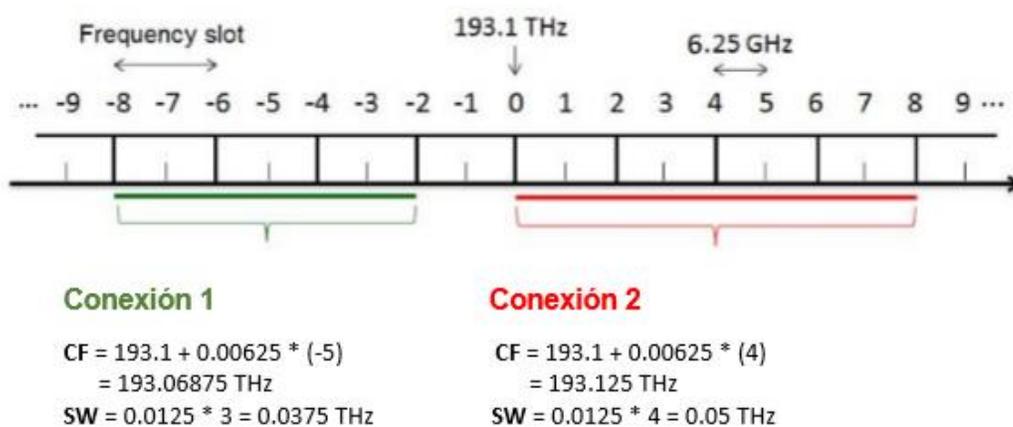


Figura 16.16. Ejemplo de concepto de ranura y CF. Adaptada de [24].

- **Enrutamiento y asignación de espectro.**

El segundo cambio en las redes tradicionales para obtener una red EON es la introducción e implementación del concepto de enrutamiento y asignación de espectro RSA (*Routing and Spectrum Assignment*), el cual permite establecer una conexión óptica elástica con un ancho de espectro flexible, mediante la asignación de *slots* o porciones de espectro sobre los cuales viaja la información adecuados a la solicitud del camino óptico de la red. Si bien las redes tradicionales WDM, a pesar de las altas tasas de transmisión que logra alcanzar, pero, debido a su granularidad rígida, solamente se había implementado el enrutamiento y asignación de longitudes de onda RWA (*Routing and Wavelength Assignment*), encargado de asignar longitudes de onda continua. Sin embargo, el crecimiento en la industria de telecomunicaciones, el desarrollo de la tecnología ha posibilitado el hecho de que las aplicaciones como texto, imagen, vídeo y audio convivan dentro de una misma red. Esto ha generado gran demanda de conexión y altos requerimientos de ancho de banda, exigiendo una nueva infraestructura de red y junto con ello la implementación del enrutamiento y la asignación de espectro flexible que se acomode a las diferentes demandas de tráfico exigidas por los usuarios.

- **Enrutamiento y asignación de espectro – *Routing and Spectrum Assignment (RSA)*.**

RSA es considerado como una de las técnicas claves de funcionalidad para lograr la asignación, transparencia de información y características de reuso del espectro, dentro de las EON. RSA es usado para encontrar una ruta con suficiente espectro libre para albergar el ancho de banda requerido por las demandas de tráfico. Es decir, que este problema se puede abordar de dos maneras tal como lo presentan en la literatura muestran dos caminos a seguir: el primero realiza de forma simultánea el enrutamiento y asignación de espectro (RSA) a un alto costo computacional, debido a la complejidad de los algoritmos, mientras que el segundo aborda el problema de forma secuencial realizando primero el enrutamiento y posteriormente la asignación del espectro (R + SA), disminuyendo la complejidad de los algoritmos y los recursos computacionales utilizados [25].

En las EON, el espectro óptico disponible se divide en ranuras (*Slices*), que son porciones con un ancho fijo de 6,25 GHz; de forma que dos ranuras consecutivas conforman un *slot*, definidos por su frecuencia central (CF) y su ancho o cantidad de *slots* asignados a la conexión, la CF define el lugar donde se centra el espectro asignado, permitiendo así el posicionamiento de cada *slot* en el espectro óptico. La Figura 1.17 [10] representa un enlace de fibra óptica la cual establece una conexión utilizando un canal de 3 *slots* de frecuencia, para una EON utilizando la tecnología *Flexgrid*. Por esta razón, para realizar una administración eficiente de los recursos de red, se introdujo el concepto de RSA considerado una de las funcionalidades clave en este tipo de redes, debido a sus características de reutilización eficiente de espectro y su transparencia de la información. Por esta razón, para establecer una conexión óptica en una red *Flexgrid*, RSA utiliza las siguientes características [25]:

- Encontrar una ruta adecuada entre un par de nodos origen y destino.
- Asignar un número de *slots* o ranuras de frecuencia necesarios para establecer una conexión.

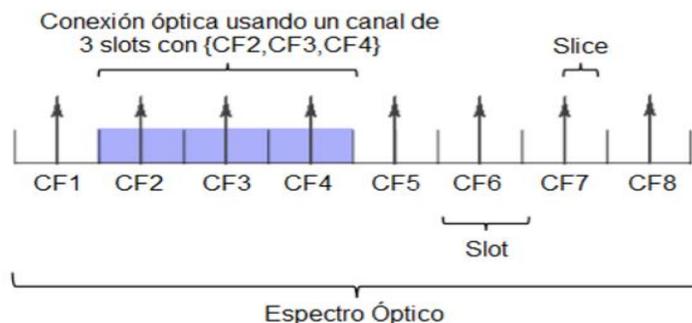


Figura 17.17. Representación lógica de un enlace de fibra óptica FlexGrid. Adaptada de [26].

De esta forma, para establecer una conexión óptica en una red *Flexgrid* con RSA, debe cumplir con dos restricciones en las EON:

- i) **Contigüidad de espectro:** Requiere que el número de *slots* asignados a una conexión sean consecutivos.
- ii) **Continuidad del espectro:** Condiciona los segmentos de espectro asignados a una conexión sean los mismos a lo largo de la ruta seleccionada.

Así, si una solicitud requiere un número x de *slots*, entonces se deben asignar x *slots* de frecuencia contiguas (debido a la restricción de contigüidad del espectro), y el mismo conjunto de *slots* debe asignarse en cada enlace a lo largo de la ruta de demanda de conexión (debido a la restricción de continuidad del espectro) [20] [25].

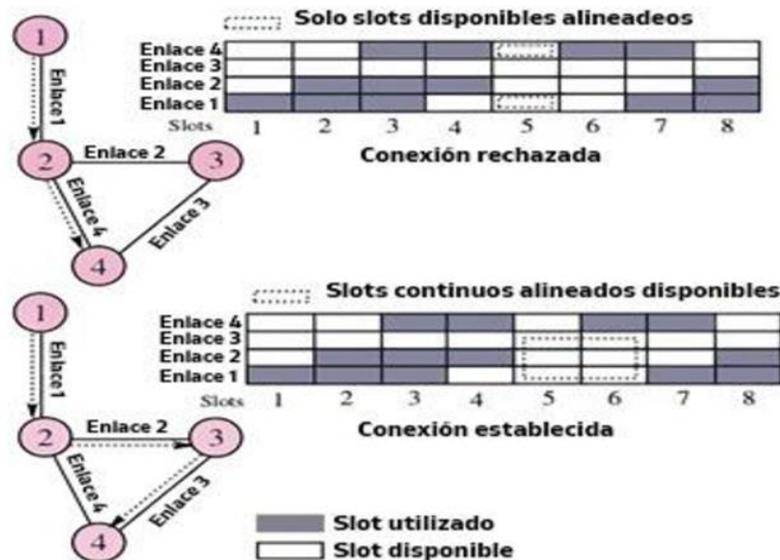


Figura 18.18. Ejemplo de continuidad y contigüidad. Tomada de [25].

Con el fin de ilustrar el concepto de continuidad y contigüidad en la asignación de espectro, se muestra en la Figura 1.18 un ejemplo, el cual supone una solicitud de conexión que requiere un ancho de banda equivalente a dos *slots* para RSA, con frecuencias desde el nodo de origen 1 hasta el nodo destino 4. En este caso la solicitud de conexión no se puede establecer a través de la ruta más corta comprendida desde 1-2-4 (que es la de menor utilización de enlaces), esto debido a que los enlaces 1-2 y 2-4 ya que tienen dos *slots* contiguos que no son continuos, por lo que no se satisfacen las restricciones de continuidad y contigüidad. Sin embargo, estas restricciones se cumplen si la solicitud utiliza la

ruta 1-2-3-4 y los *slots* de frecuencia 5 y 6 se utilizan durante la conexión desde el nodo origen 1 y nodo destino 4 [25].

Para establecer una ruta óptica elástica EOP (*Elastic Optical Path*), el problema RSA se puede simplificar en dos partes; por un lado, el subproblema de enrutamiento R (*Routing*), que consiste en calcular la ruta entre los nodos de origen y destino a través de la topología de la red; y por otro, el subproblema de asignación de espectro SA (*Spectrum Assignment*), que selecciona los recursos espectrales que se asignan a la solicitud de conexión [20]. Estos subproblemas se describen a continuación.

- **Enrutamiento.**

El proceso de enrutamiento implica dos actividades básicas como lo son: determinar las rutas óptimas y transportar los datos a través de la red desde un nodo origen a un nodo destino. Ese transporte de información es conocido como conmutación de paquetes, ahora, aunque el transporte de datos se considera sencillo, el proceso de determinación de una ruta puede llegar a ser bastante complejo. Razón por la que investigaciones anteriores han planteado esquemas de enrutamiento para facilitar ese proceso: enrutamiento fijo, enrutamiento fijo alternativo y enrutamiento adaptativo [27].

- **Enrutamiento fijo FR (*Fixed Routing*).**

Este esquema de enrutamiento consiste en elegir siempre la misma ruta fija entre un par de nodos entre origen y destino determinados. Por lo cual, comúnmente se selecciona la ruta de camino más corto, lo que hace que este enfoque sea considerado el método más sencillo para enrutar las solicitudes de conexión. Y a su vez, es considerado como la técnica la cual busca disminuir el tiempo de establecimiento de conexión, pero es propensa a tener alta probabilidad de bloqueo [24] [25]. La Figura 1.19. Muestra la ruta más corta para establecer una conexión entre el nodo 0 y nodo 2 en una red de 6 nodos y 8 enlaces.

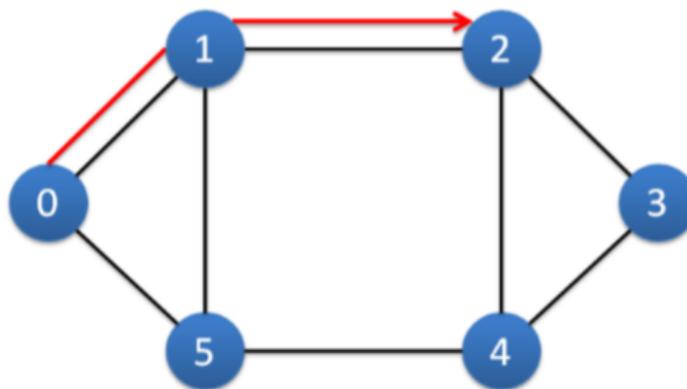


Figura 19.19. Ruta camino más corto (nodo 0 a nodo 2). Tomada de [24].

Dentro de este esquema de enrutamiento fijo las técnicas más utilizadas se destacan: algoritmos de camino más corto SP (*Shortest Path*) entre ellos: *Dijkstra* y *Bellman-Ford*, los cuales buscan el mínimo consumo de recursos; algoritmo peso por salto HW (*Hop Weight*), cuyo objetivo es disminuir la probabilidad de bloqueo, eligiendo el camino con el menor número de saltos; algoritmo de menor distancia DW (*Distance Weight*), busca una reducción en los retardos, ya que se selecciona el camino de menor distancia [10].

- **Enrutamiento Fijo Alternativo FAR (*Fixed Alternate Routing*).**

Este esquema es una versión actualizada de FR, en FAR, se consideran múltiples rutas fijas entre el nodo origen y destino. En cada nodo, la red mantiene una tabla de enrutamiento que contiene una lista de rutas fijas ordenada para todos los demás nodos. Estas rutas son calculadas sin conexión, además, si llega una solicitud entre un par nodos origen destino, el nodo origen será el encargado de intentar establecer la ruta de conexión desde cada una de las rutas en la tabla de enrutamiento tomadas en secuencia (rutas alternativas) hasta encontrar una ruta con los recursos de red o *slots* de frecuencia disponibles en cada uno de los enlaces requerido, de lo contrario si en la lista de rutas alternativas no se encuentre una ruta con la cantidad de espectro necesario, la solicitud de conexión será bloqueada, repitiendo siempre el mismo proceso [24], [25]. En la Figura 1.20. se muestra la primera ruta más corta (línea continua) y una ruta alternativa (línea punteada) desde el nodo 0 al nodo 2.

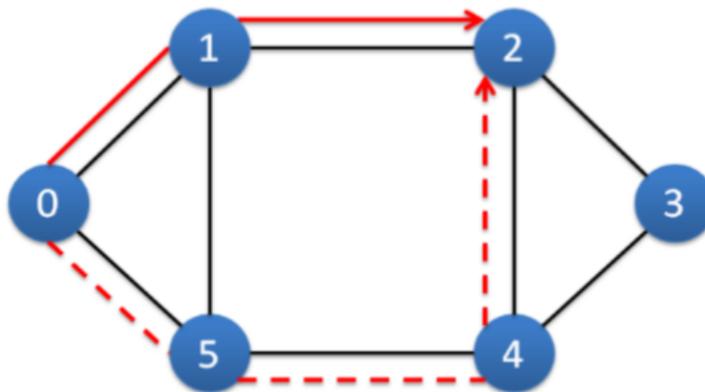


Figura 20.210. Rutas: primaria y alternativa (nodo 0 a nodo 2). Tomada de [24].

- **Enrutamiento Adaptativo AR (*Adaptive Routing*).**

En este esquema, las rutas entre los nodos origen destino se eligen dinámicamente, dependiendo del estado de los enlaces de la red. La información de los enlaces de red es determinada por el conjunto de todas las conexiones que están activas. La técnica más aceptable de AR es el enrutamiento de ruta con menor costo y la más corta. Dado que cada enlace no utilizado en la red

tiene un valor de 1 unidad, mientras que el valor de cada enlace de la red utilizado se considera ∞ (enlace congestionado). Si al llegar una conexión, se determina la ruta más corta entre los nodos origen y destino con un valor bajo y si hay varias rutas con la misma distancia y el mismo costo, entonces se elige uno de los enlaces al azar. Debido a que en AR la conexión se considera en todas las rutas posibles entre el par de nodos, mientras que, si no hay una ruta con un segmento de espectro disponible, la conexión se considera bloqueada, lo cual proporciona una menor probabilidad de bloqueo de llamadas, pero con un alto tiempo de configuración en comparación a otros algoritmos de enrutamiento. En la Figura 1.21, se presenta una conexión entre los nodos 0 y 2. En este caso no es posible utilizar los enlaces (1,2) y (4,2) (rutas más cortas) debido a que se encuentran ocupados, por lo cual se debe elegir la ruta más larga, pero de menor costo 0, 5, 4, 3 y 2 [24] [25].

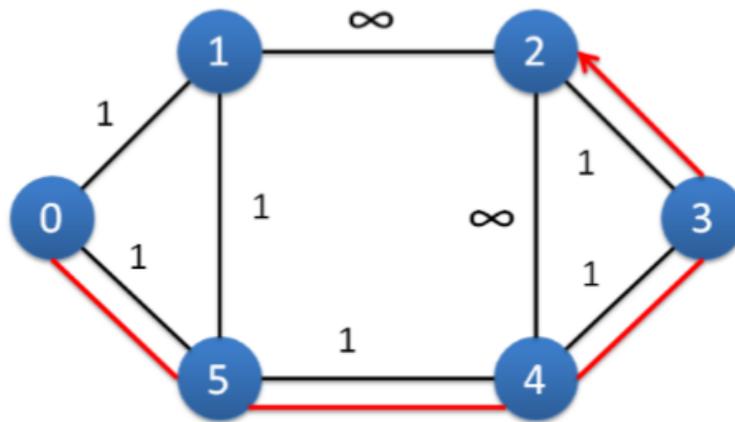


Figura 22.231. Ruta adaptiva (nodo 0 a nodo 2). Tomada de [24].

- **Asignación de espectro.**

Un aspecto importante de las redes ópticas basadas en *Flexgrid*, es su flexibilidad en la asignación del ancho de banda que es requerido por cada canal óptico el cual se ajusta dinámicamente en función de la demanda que se recibe, de esta manera los recursos espectrales pueden ser mejor aprovechados mediante una asignación de espectro más acorde a las necesidades reales de la red. Esta capacidad puede definirse como una asignación elástica del espectro y se espera que su aplicación en las EON (*Flexgrid*) proporcione un mejor rendimiento de la red, con el fin de adaptarse mejor a las necesidades de ancho de banda en cada momento [25].

En esta sección se presentan tres esquemas diferentes para la SA (*Spectrum Assignment*) en redes ópticas elásticas, en términos de la frecuencia central (CF) y el ancho del espectro.

- **Esquema de asignación de espectro fijo en el tiempo FSA (Fixed Spectrum Assignment).**

En el esquema SA fijo, la elasticidad en el tiempo no está permitida, debido a que tanto la CF como el ancho de espectro asignado permanecen fijos durante todo el tiempo de conexión. En este periodo de tiempo las demandas podrán utilizar todo o solo *slots* del espectro asignado con el fin de transmitir la información solicitada en cada periodo de tiempo, sin embargo, no comparte espectro con otros canales u otras demandas. Por tanto, al comparar el ancho de banda solicitado y la capacidad del espectro asignado, se pueden distinguir dos casos [20] [25] [26].

- Quando el ancho de banda requerido por una conexión es menor a la capacidad del espectro asignado, la cantidad de espectro utilizado para transportar ese tráfico es menor al asignado, como resultado, se tiene un uso ineficiente del espectro, ya que las ranuras no utilizadas se pueden utilizar para solicitudes de conexión posteriores [26].

En la Figura 1.22.a), muestra el ancho de banda requerido por una conexión en el tiempo t el cual es igual a la capacidad del canal asignado, sin embargo, el ancho de banda requerido es menor a la capacidad del espectro asignado en un tiempo posterior t' .

- Quando el ancho de banda requerido por una conexión es mayor a la capacidad del espectro asignado, la cantidad de espectro utilizado para transportar ese tráfico es mayor al asignado, por lo tanto, no es posible establecer la conexión [26].

En la Figura 1.22.b) la cual muestra que en el tiempo t la solicitud de conexión puede ser atendida, sin embargo, en el tiempo t' no es posible, debido a que el ancho de banda asignado para la conexión es insuficiente.

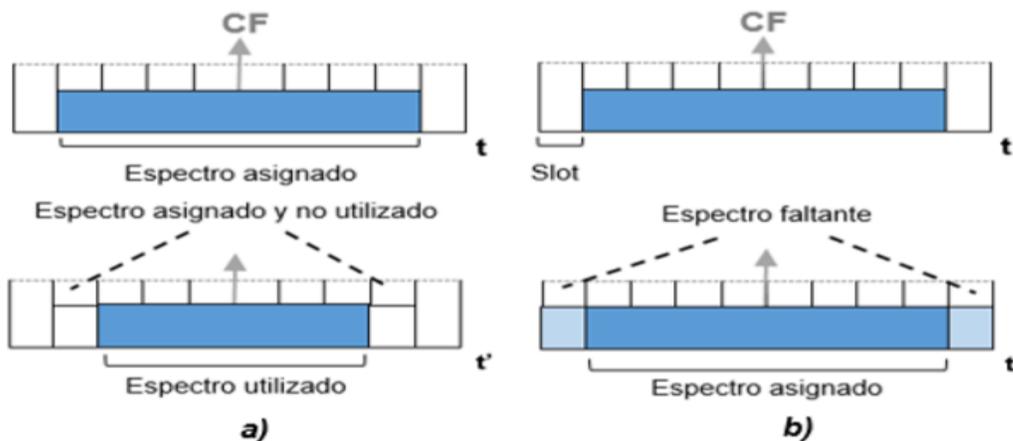


Figura 1.24225. Esquema de asignación de espectro fijo: a) Ancho de banda requerido y b) Ancho de banda asignado. Adaptada de [25].

- **Esquema de asignación de espectro semi-elástico en el tiempo SSA (Semi-Elastic Spectrum Allocation).**

A diferencia del esquema de SA fijo, en el esquema de SA Semi-Elástico proporciona una mayor flexibilidad, en este esquema la CF permanece fija, y el ancho del espectro asignado puede variar en cada intervalo de tiempo, ajustándose a los requerimientos de tráfico en la asignación de nuevos segmentos de espectro que se ajusta al ancho de banda requerido en cualquier momento, del mismo modo, también se puede reducir la cantidad de segmentos de espectro si la conexión lo requiere [25] [26]. En este esquema se pueden distinguir dos escenarios:

- Si se reduce el ancho de banda requerido por una conexión, se reducirá la capacidad del espectro asignado y se liberará ancho de banda no necesarios en cada extremo del espectro asignado, los cuales pueden ser utilizados y estarán disponibles para solicitudes de conexión posteriores [26].
- La Figura 1.23.a) muestra la asignación de espectro para una conexión óptica con un espectro de 6 intervalos o segmentos el cual reduce su ancho de banda requerido a 2 intervalos. Mientras que, si se produce un aumento en el ancho de banda requerido, pueden asignarse nuevos segmentos contiguos a los extremos de la CF, siempre y cuando estos segmentos cumplan con las condiciones de continuidad y contigüidad del espectro. La Figura 1.23.b) representa una conexión que incrementa el ancho de banda requerido de 6 segmentos en un tiempo t a 8 segmentos en un tiempo t' [25].

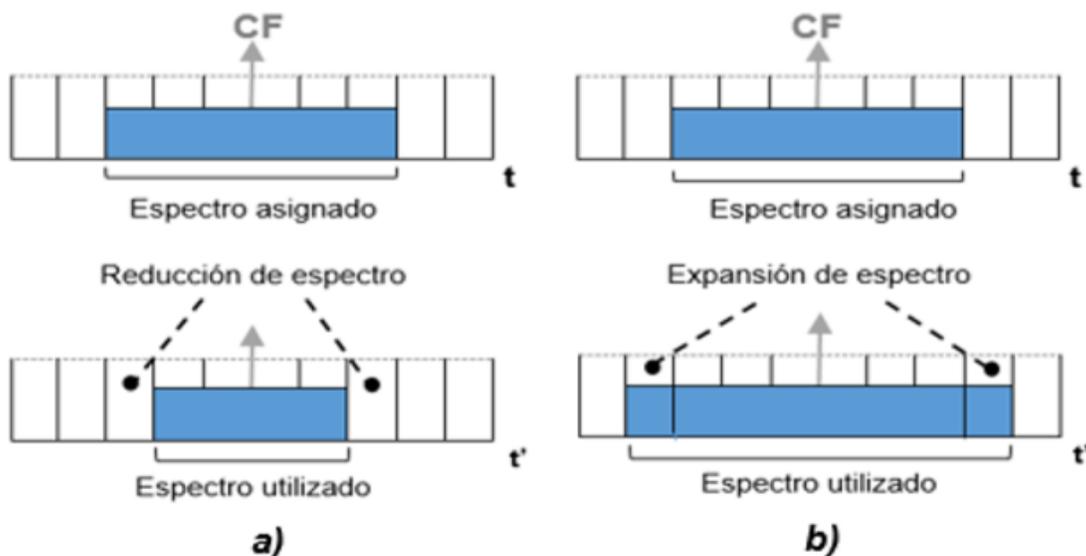


Figura 1.263. Esquema asignación de espectro semi-elástico en RSA: a) Reducción del Ancho de banda requerido y b) Incremento del ancho de banda asignado. Adaptada de [25].

Como consecuencia de la elasticidad de este esquema, los segmentos de frecuencia pueden ser compartidos entre conexiones ópticas vecinas, pero utilizado por máximo una conexión por intervalo de tiempo [28], como se muestra en la Figura 1.24.

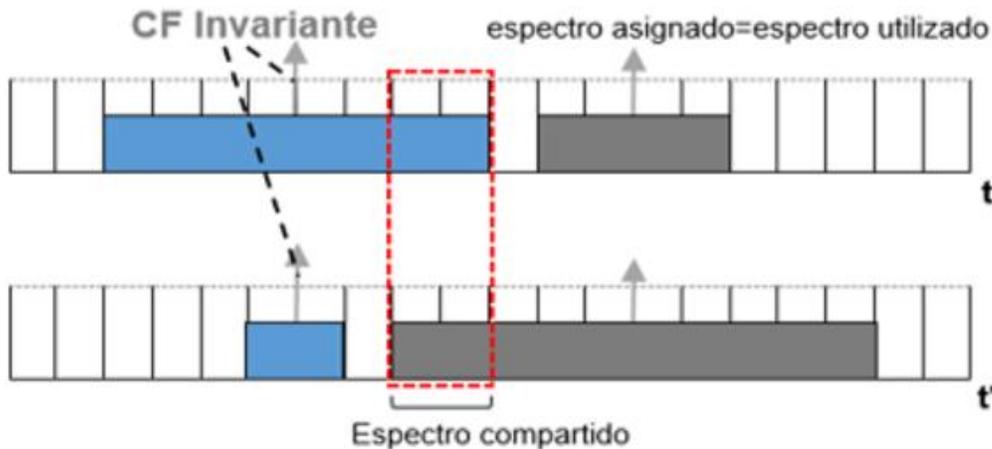


Figura 1.27428. Esquema asignación compartido semi-elástico en RSA. Adaptada de [28].

- **Esquema de asignación de espectro elástico en el tiempo ESA (Elastic Spectrum Assignment).**

El esquema SA Elástico, tanto la CF como el ancho espectral asignado, pueden variar en cada periodo de tiempo, esto permite que el esquema elástico añada un nuevo grado de libertad con respecto a SSA. No solo permite variar la cantidad de segmentos de espectro por cada conexión en cualquier periodo de tiempo, sino que también se puede cambiar la CF, de esta manera, los canales compartirán espectro, pero no se asignará el mismo segmento a dos canales distintos en el mismo periodo de tiempo [20].

En el esquema SA elástico se pueden distinguir dos escenarios en función del movimiento de la CF:

- Expansión/reducción del espectro:** En este caso, los movimientos de las frecuencias centrales se limitan a un cierto rango de espectro; por lo tanto, la reasignación del espectro se restringe a las FC vecinas [26] [28]. La Figura 1.25. representa dos conexiones ópticas que varían el ancho del espectro asignado y la CF de las solicitudes de conexión en los tiempos t y t' , de acuerdo al rango especificado para cada CF.

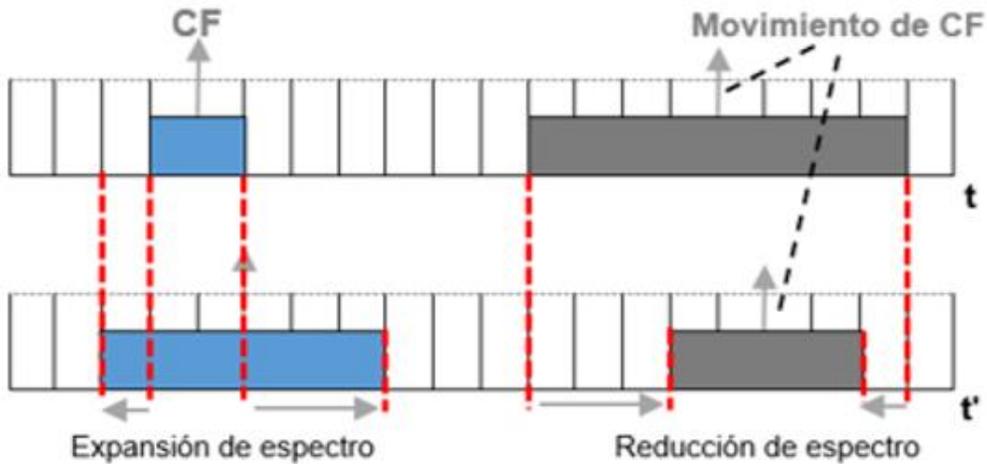


Figura 1.295. Esquema asignación de espectro elástico con expansión/contracción en RSA. Adaptada de [28].

b) Reasignación elástica del espectro: Es el caso menos restrictivo, ya que cualquier parte del espectro puede reasignar completamente el espectro y los movimientos de la CF no están limitados [25]. El esquema SA elástico con reasignación de espectro ofrece el mejor rendimiento de utilización de espectro en todos los esquemas de SA, pero a veces puede no ser factible debido al costo computacional y/o a los requisitos del hardware o del plano de control [26] [28]. La Figura 1.26. representa un escenario en el que hay dos conexiones ópticas que varían el ancho del espectro asignado y la CF del canal de espectro se re-assigna.

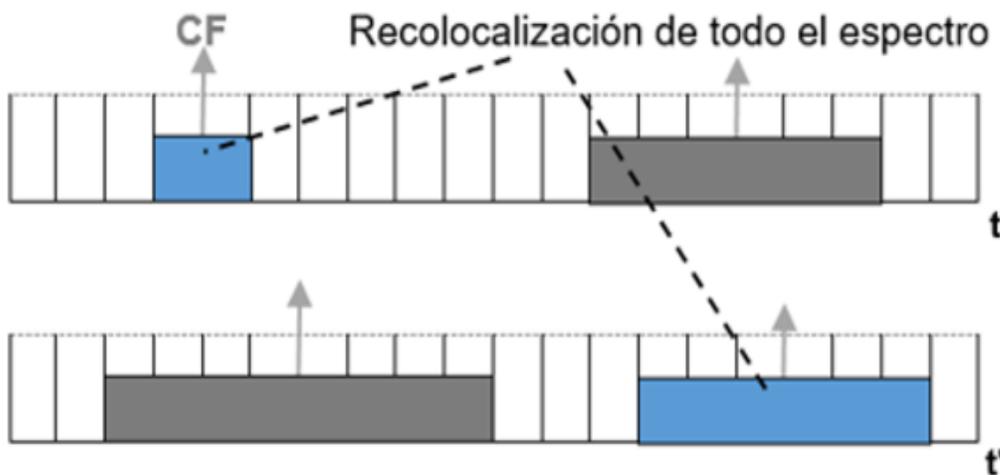


Figura 1.306. Esquema de reasignación de espectro elástico en RSA. Adaptada de [28].

1.5. Características de las redes ópticas elásticas (EON).

Las redes ópticas elásticas (EON) mejora el límite de asignación de espectro óptico de la red tradicional WDM rígida, las EON aumentan flexibilidad en el aprovisionamiento de conexiones ya que emplean una rejilla de espectro flexible, permitiendo mayor eficiencia en el uso de espectro. A continuación, se presentan sus características y aspectos más relevantes [29].

1.5.1. Capacidad en la red para ajustarse dinámicamente al ancho de banda.

Las redes tradicionales basadas en WDM han experimentado una evolución rápida con respecto al crecimiento exponencial en capacidad, lo que conlleva a un uso ineficiente en el espectro óptico. Por otra parte, en las EON permiten dividir el espectro óptico de forma flexible, es decir, pueden asignar la cantidad de espectro necesario de acuerdo con su velocidad de bits y la distancia de transmisión requerida según la demanda de los usuarios finales.

Para lograr este objetivo, se han realizado diversas investigaciones en la búsqueda de nuevos formatos de modulación y tecnologías que conlleven a la asignación de espectro óptico flexible a nivel físico dentro de las EON [29] [30].

- **Formatos de modulación:**

Entre los formatos de modulación, se destacan las investigaciones en la Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), Nyquist WDM (N-WDM) y la Generación de Forma de Onda Arbitraria Óptica Dinámica OAWG (*Dynamic Optical Arbitrary Waveform Generation*). Cabe resaltar que los estudios se centran en OFDM, la cual permite transmitir canales de gran capacidad mediante la división en subportadoras ortogonales de menor velocidad multiplexadas conjuntamente a través de la red. OFDM permite ajustar la velocidad de transmisión, a las necesidades del cliente, mediante la elección del número de subportadoras a transmitir [29].

- **Tecnologías de asignación:**

Entre las tecnologías de estudio para las EON la tecnología más relevante es “*Flexgrid*”: Esta tecnología permite dividir el espectro óptico disponible en segmentos o *slots* de menor granularidad que en las redes tradicionales basadas en WDM, lo que permite que el espectro sea asignado de acuerdo a los requerimientos del ancho de banda del usuario, evitando así el desperdicio

de espectro óptico. En la Figura 1.27. Muestra la diferencia en la asignación de espectro entre WDM y “Flexgrid”. La cual muestra la tecnología WDM con un ancho de banda del canal fijo (rejilla espectral fija de 50 GHz), mientras que en la tecnología Flexgrid, se utilizan subportadoras de tamaño fijo superpuestas sin interferirse entre ellas, y se ajustan a la solicitud de conexión, de manera que el ancho de banda total puede ser flexible al requerimiento del servicio [29].

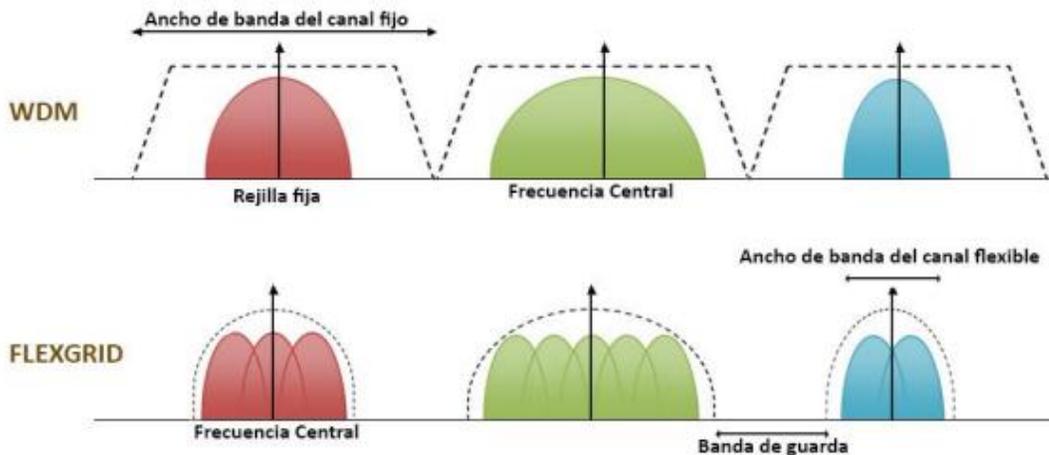


Figura 1.317. Diferencia asignación de espectro entre WDM (rígido) y FlexGrid (elástico). Tomada de [29].

- **Uso de transpondedores flexibles que permiten tasas de bit variables.**

Una EÓN tiene la capacidad de aceptar conexiones ópticas con velocidades de datos que pueden estar por encima o por debajo de una sola longitud de onda (lo que no está permitido en las redes tradicionales basadas en WDM), ya que utiliza transpondedores flexibles (equipos transmisores y receptores ópticos) en los bordes de la red. Estos se caracterizan por tener distintos grados de flexibilidad con respecto a los formatos de modulación, la velocidad de bits y el número de subportadoras que conforman el canal [10] [31].

- **Uso de distintos formatos de modulación de acuerdo con los requisitos de cada conexión.**

Las EÓN, deben ser capaces de transmitir canales tanto de baja como de alta capacidad; (por ejemplo: VoIP, Video bajo demanda, entre otros) por esta razón, la aceptación de diferentes formatos de modulación representa una característica muy importante dentro de las EÓN, ya que permite a la red adaptarse a los requerimientos de cada conexión, tales como ancho de banda y distancia de transmisión. De esta manera lo que se hace es elegir el formato de modulación que más se adecue a las características deseadas, evitando el desperdicio de ancho de banda que se consigue al imponer el tipo de modulación [29].

1.5.2. Sistemas de transmisión para redes ópticas elásticas.

De acuerdo con el principio de funcionamiento de las EÓN, y al continuo aumento de tráfico en la red y la gran necesidad de aumentar la capacidad y el rendimiento en las redes de transporte las cuales deben adaptarse tanto a la transmisión eficiente de canales con una demanda de baja capacidad (10/40 Gbps) como la transmisión de canales con una demanda mayor capacidad en el futuro (100/400 Gbps e incluso 1 Tbps). Por esta razón, se han propuesto algunas tecnologías de transmisión que permiten conseguir una transmisión espectralmente eficiente [20].

- **Multiplexación por división de frecuencias ortogonales OFDM (*Orthogonal Frequency División Multiplexing*).**

OFDM es una tecnología de modulación multiportadora que transmite un flujo de datos de alta velocidad dividiéndolo en múltiples canales ortogonales, denominados subportadoras, cada una lleva una velocidad de datos relativamente baja. Esta división permite ajustar el ancho de banda de la señal a transmitir eligiendo únicamente el número de subportadoras que la generan.

OFDM es una clase especial de Modulación Multi-Portadora MCM (*MultiCarrier Modulation*) basada en la propiedad de ortogonalidad de todas las señales que forman el canal a transmitir. Esta propiedad permite ajustar el espectro de los sub-canales en un ancho de banda mucho menor, en comparación con el caso WDM, ya que con la tecnología WDM se necesita de una separación fija entre canales adyacentes como se ve en Figura 1.28.a), mientras que en la tecnología OFDM permite que los sub-canales puedan superponerse entre sí debido a su condición de ortogonalidad, como se ve en la Figura 1.28.b), sin generar interferencias, reduciendo así gran parte del espectro no utilizado, lo que genera un mayor uso eficiente de los recursos espectrales, lo que aumenta la eficiencia espectral de transmisión. [20] [21].

En algunos sistemas es posible encontrar en la actualidad OFDM-WDM, donde la señal de datos OFDM espectralmente avanzada utiliza receptores WDM estándar simples convirtiendo primero la señal OFDM en una señal similar a WDM compatible con un receptor WDM tal como lo muestra la figura 1.29, por lo tanto OFDM es un formato atractivo para transmitir datos con una eficiencia espectral muy alta y una alta tolerancia a la dispersión con OFDM óptico mediante la multiplexación y demultiplexación de las subportadoras en el dominio óptico, lo cual permite la generación de supercanales con capacidad de Tbit/s, es decir, un receptor OFDM simple que permita el uso de receptores WDM (OFDM-WDM).

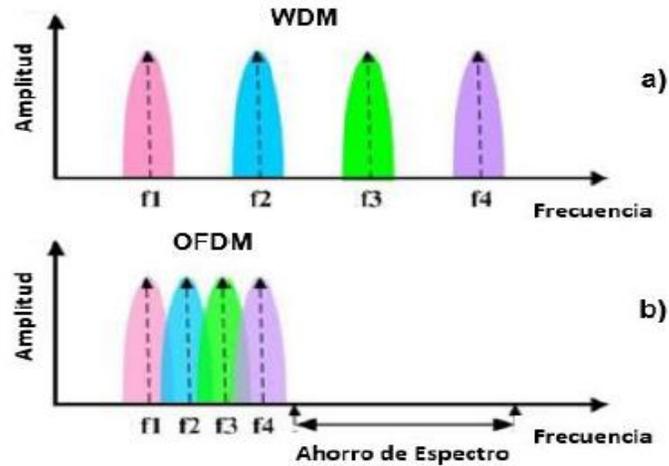


Figura 1.328. Espectro de señales a) WDM y b) OFDM. Adaptada de [21].

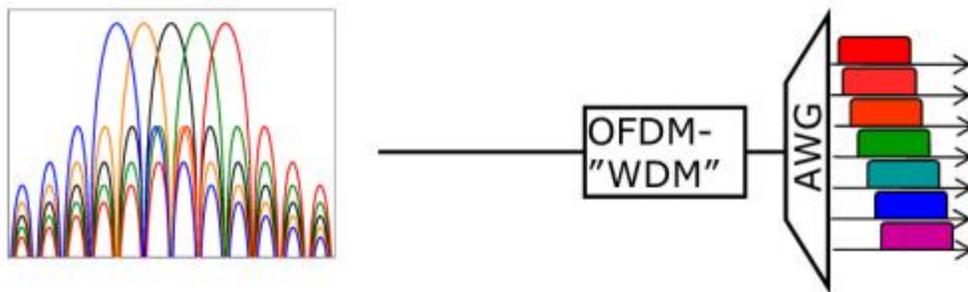


Figura 33.29. Señal OFDM – WDM. Tomada de [50].

De esta forma, en el dominio espectral, la propiedad de ortogonalidad entre múltiples subportadoras se establece cuando las frecuencias centrales de cada subportadoras se encuentran separadas entre sí, dado por la Ecuación (4).

$$\text{Separación entre Frecuencias Centrales} = \frac{n}{Ts}$$

Ecuación 4. Separación entre frecuencias centrales.

Donde, n es un número entero y T_s es la duración del símbolo.

En la Figura 1.30 puede observarse la principal característica de ortogonalidad de OFDM, se puede observar que cuando una subportadora alcanza espectralmente el máximo valor, el resto de subportadoras se encuentran en el punto cero de potencia. De esta manera, cuando se realiza el muestreo de las subportadoras en su punto máximo, se conseguirá que no haya solapamiento espectral, por tanto, la señal de información se pueda recuperar sin error [20].

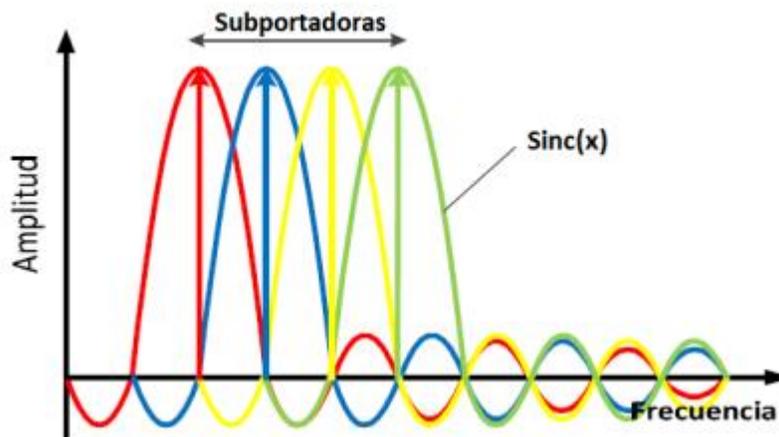


Figura 34.30. Señal OFDM en el dominio de la frecuencia. Tomada de [20].

Debido a los grandes beneficios de OFDM, las redes EON generalmente hacen uso de diferentes técnicas de multiplexado y una de las más comunes es el Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales por su eficiente asignación de recursos en redes banda ancha, la cual se adapta a la demanda de usuarios finales; es así que en los últimos años se está adoptando como una técnica de transmisión óptica debido a sus características las cuales encajan con la definición de las EON en su eficiencia espectral [20] [31].

- **Nyquist WDM.**

Otra de las tecnologías que proporciona alta eficiencia espectral y puede utilizarse para la transmisión de múltiples canales es *Nyquist WDM*. Esta técnica consiste en la concatenación de varios canales WDM, cada uno con una respuesta rectangular en frecuencia y un ancho de banda igual a la frecuencia de símbolo R_s , lo cual permite una alta eficiencia espectral con lo cual teóricamente alcanza máxima eficiencia espectral cuando se transmite (1 símbolo/Hz). En la Figura 1.31a) se muestra una señal N-WDM en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Por otra parte, debido a su poca implementación y necesidad de generar una señal completamente rectangular en el dominio de la frecuencia como se observa en la Figura 1.31b), lo que hace que en la actualidad varias investigaciones están centradas en la aplicación de la tecnología OFDM dentro de las EON [20].

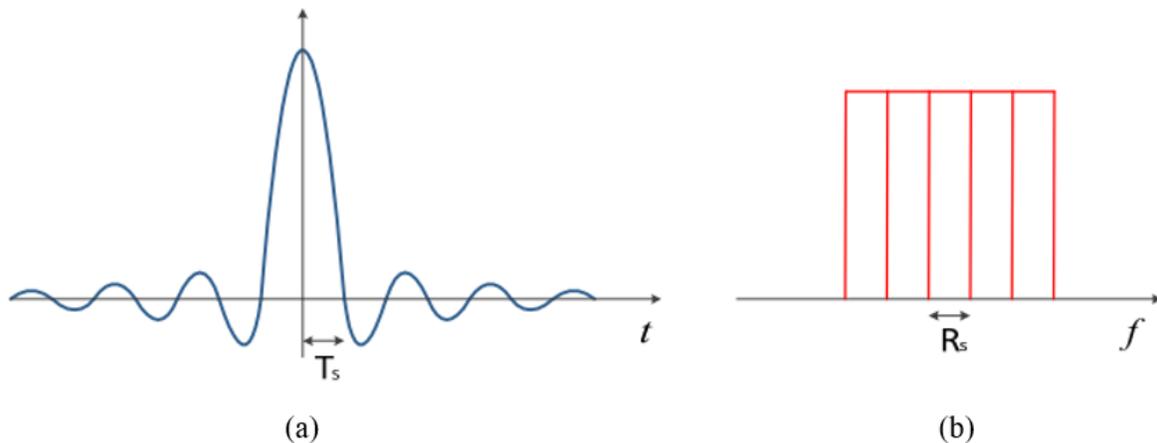


Figura 35.31. Señal N-WDM en el dominio de a) Tiempo y b) Frecuencia. Tomada de [20].

1.5.3. Arquitectura de una red óptica elástica.

Debido a las necesidades y rápido crecimiento de los servicios de Internet, es deseable una nueva arquitectura de red óptica elástica con una velocidad de datos con granularidad flexible y una asignación de espectro flexible de acuerdo con la velocidad de transmisión, una alta eficiencia en el uso de recursos de ancho de banda, un bajo costo y un bajo consumo de energía. Recientemente, se han propuesto varias arquitecturas de red de este tipo, que han atraído cada vez más la atención [21]. A continuación, se detallan las arquitecturas más relevantes de las EON.

- **Red de trayectoria óptica elástica cortada por espectro (SLICE).**

Esta arquitectura de red (*Slices*), propuesta en [32], se basa en las características de multiplexación de subportadoras y la asignación flexible del espectro óptico, típicas de la tecnología OFDM, este grupo de redes ópticas elásticas permite adaptar las subportadoras al ancho de banda requerido, con lo cual se logra romper las limitaciones de asignación de longitud de onda de rejilla fija presentes en la tecnología tradicionales como WDM [31][33]. Así, la arquitectura *Slice* soporta múltiples rutas ópticas con velocidades de datos menores o superiores a la capacidad de una longitud de onda (sublongitud o súper longitud de onda) de una manera altamente eficiente en cuanto al espectro se refiere, mediante la introducción de transpondedores de ancho de banda variable BVT (*Bandwidth Variable Transponders*) en la frontera de la red (Nodo Borde) y de conmutadores ópticos cruzados de ancho de banda variable BV-WXCs (*Bandwidth Variable Wavelength Cross Connect*) en el núcleo de la red (Nodo Core) [21][33]. Más adelante, se estudiarán con más detalle cada uno de los anteriores componentes.

- **WDM óptica flexible.**

La arquitectura de red FWDM propuesta en [34], presenta un concepto similar al de la arquitectura *Slices*, ya que es capaz de realizar una asignación dinámica de recursos mediante el uso de rejillas elásticas y la asignación flexible del espectro óptico. Si bien la tecnología FWDM es la evolución de la tradicional tecnología WDM, la cual permite una modulación de una sola portadora, así como otros esquemas de modulación multiportadora basados en OFDM es necesario la utilización de transpondedores (WXC's) en su arquitectura [21]. En esta arquitectura, es importante mencionar que la transferencia de símbolos libres de interferencias; es necesario utilizar la técnica de modulación N-WDM (*Nyquist WDM*), que consiste en el uso de subportadoras con un espectro casi rectangular, difícil de conseguir en la práctica [33]. Por otra parte, esta arquitectura puede compartir sus recursos espectrales para evitar la utilización ineficiente de los recursos debido a que puede ser adaptable al tráfico dinámico requerido por los usuarios finales de acuerdo con la demanda de tráfico [34].

- **Red óptica elástica con tasa de datos.**

La arquitectura de red óptica elástica con tasa de datos propuesta en [35], utiliza un único transpondedor de velocidad sintonizable que puede operar a diversas velocidades de datos para manejar todo tipo de tráfico. Esta red óptica elástica ofrece soluciones similares a la arquitectura WDM tradicional con velocidad de línea mixta MLR (*Mixed Line Rate*), pero con mayor flexibilidad, ya que simplifica el diseño de la red y permite compartir los recursos disponibles a los diferentes servicios. Esta arquitectura de red óptica elástica puede emplear tecnologías de multiplexación mono portadora y multiportadora, mientras que difiere de *Slice* y FWDM en que la asignación de espectro óptico se realiza mediante el uso de rejilla fija. Si bien, esto implica una compatibilidad total con la arquitectura de red WDM actual, la cual no se ajusta a una adaptación flexible del espectro óptico ni una alta eficiencia del mismo [21].

La Figura.1.32 representa gráficamente las diferencias de alcance entre las tres arquitecturas propuestas anteriormente.

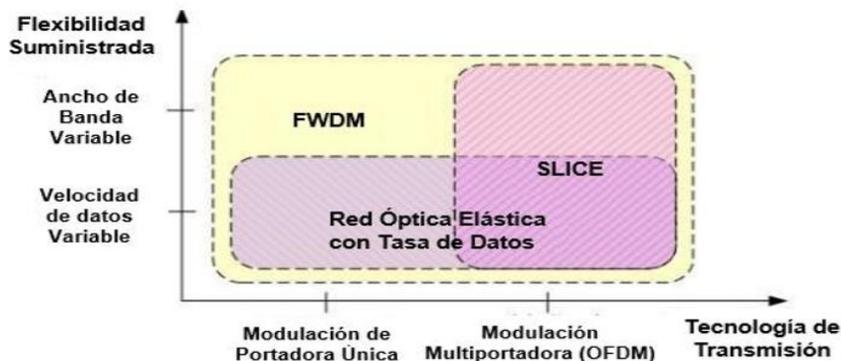


Figura 36.32. Diferencias de alcance entre las arquitecturas SLICE, FWDM y la red óptica elástica con tasa de datos. Adaptada de [21].

1.5.4. Arquitectura de red de trayectoria óptica elástica cortada por espectro (SLICE).

La arquitectura *Slice* como se mencionó anteriormente basada en la tecnología OFDM, permite asignar los recursos espectrales disponibles de manera flexible a una conexión o ruta óptica de extremo a extremo; de esta manera, el ancho de banda para una conexión óptica en *Slice* puede expandirse o contraerse de acuerdo con el volumen de tráfico y los requerimientos y solicitudes del usuario final [32]. Permitiendo de esta manera el uso eficiente de los recursos en la asignación de espectro óptico.

De esta forma, la arquitectura básica de una red óptica elástica de espectro ranurado (*Slice*) (ver Figura 1.13) y como se ha mencionado anteriormente, los principales componentes de este tipo de redes son los BV-WXC y el BVT, se describen con más detalle a continuación:

- **Transpondedor de ancho de banda variable (BVT).**

Este dispositivo es capaz de adaptarse a múltiples velocidades de datos desde sublongitud de onda hasta súper longitud de onda mediante el uso de formatos de modulación disponibles en la arquitectura de red. Así, para lograr una alta utilización de los recursos espectrales, el BVT genera una señal óptica utilizando sólo los recursos espectrales necesarios, de acuerdo con la velocidad de datos del cliente y las condiciones del canal con lo cual se espera reducir al mínimo la separación entre las conexiones contiguas [21].

- **Conmutador óptico cruzado de ancho de banda variable (BV-WXC).**

El conmutador óptico BV-WXC asigna una conexión cruzada con un ancho de banda adecuado para crear una ruta óptica de extremo a extremo de tamaño apropiado. Por lo tanto, cada BV-WXC en la ruta necesita configurar de manera flexible su ventana de conmutación de acuerdo con el ancho de banda de la señal óptica entrante, a fin de aumentar o disminuir el ancho de banda de la conexión óptica elástica [21].

CAPÍTULO II. Algoritmos, herramientas de simulación y metodologías.

En este capítulo se caracterizan algunos de los algoritmos utilizados actualmente para la asignación de recursos en las redes ópticas elásticas y se eligen los que pueden ser útiles para el proceso de investigación. También se describen las herramientas de software disponibles (*OptSim*, *Matlab*, *OptiSystem* y *OMNeT*) para el desarrollo del presente trabajo de investigación, las cuales permiten la simulación de redes y su comportamiento según características como: tipo de licencia, implementación de tecnologías a nivel de enlace y de red y aplicación. Finalmente, para cerrar este capítulo se presenta la metodología de investigación seleccionada y su aplicación dentro del trabajo de grado.

2.1. Algoritmos para la asignación de recursos en redes ópticas elásticas.

La necesidad de hacer una gestión adecuada de los recursos en la asignación de espectro óptico en las redes ópticas *flexgrid* ha llevado al desarrollo de numerosos algoritmos para controlar parámetros de enrutamiento, anchos de banda, políticas de uso, calidad de servicio, entre otros, de toda la red. A continuación, se describen algunos algoritmos para la asignación de recursos espectrales en las redes ópticas los cuales se pueden clasificar en función de las solicitudes que van llegando, en dos grandes grupos: algoritmos RSA estáticos (*offline*) y algoritmos RSA dinámicos (*online*) [26].

2.1.1. Algoritmos estáticos.

Los algoritmos para el RSA estático, se ocupan del enrutamiento y la asignación de espectro durante la planificación de la red, en donde la topología y el conjunto de demandas de tráfico son conocidos de antemano y se mantienen constantes todo el tiempo [31], [36]. Estos algoritmos buscan obtener una solución óptima para realizar el enrutamiento y la asignación de espectro, para dar solución al problema RSA estático en redes, en el caso de las redes ópticas elásticas (*Flexgrid*), las funciones pueden variar así: maximizar el número de *slots* de frecuencia consecutivos que se dejan libres después de una petición, minimizar los saltos de una ruta o reducir la posición en el espectro del último slot de frecuencia asignado a una petición, Teniendo en cuenta lo anterior, la mayor dificultad se presenta cuando el número de condiciones se incrementa. Para reducir la complejidad, es posible descomponer el problema RSA en dos subproblemas: enrutamiento y asignación de espectro (R+SA), abordados por separado y de forma secuencial; sin embargo, abordar los dos subproblemas de forma secuencial no garantiza una solución óptima. [20].

2.1.2. Algoritmos dinámicos.

Los algoritmos para el RSA dinámico, se ocupan del enrutamiento y la asignación de espectro durante la operación de la red, cuyo objetivo es tratar que la red acepte mayor número de demandas, en este caso la topología es conocida pero las demandas de tráfico no lo son, lo que hace que el problema RSA dinámico sea más complejo de resolver debido a la naturaleza aleatoria del tráfico en la red [36].

La solución al problema RSA dinámico consiste principalmente en resolver los casos de restauración de conexiones, reasignación de recursos espectrales y gestión de nuevas solicitudes de conexión, con la red en funcionamiento [20]. De esta manera el problema RSA puede atacarse según el funcionamiento del algoritmo, ya sea, con algoritmos de una etapa (*one-step*) buscan resolver los problemas de enrutamiento y de asignación de espectro de forma simultánea o dos etapas (*two-steps*), que tratan de solucionar los problemas de enrutamiento y asignación de espectro de forma secuencial [10] [37].

2.1.3. Algoritmos RSA.

En esta sección se presentan con más detalle los algoritmos, para dar solución a la asignación de espectro, se decide caracterizar los algoritmos comúnmente implementados (nivel investigativo) y seleccionar aquellos que han obtenido los mejores resultados, para posteriormente implementarlos en los escenarios de simulación.

Los algoritmos de asignación de espectro comúnmente estudiados son:

- **First fit (FF).**

Este esquema de asignación opera mediante la enumeración de todos los *slots* de espectro disponibles en orden ascendente (índice de *slot*). De esta forma, cuando se presenta una solicitud de conexión que requiere dos *slots* y tiene que ser atendida, este algoritmo trata de seleccionar, entre los disponibles, los *slots* consecutivos necesarios desde el slot identificado con el índice más bajo hasta el más alto los cuales permanecen disponibles para conexiones futuras. Cabe resaltar que el algoritmo rechaza la solicitud de conexión si no se dispone del número de *slots* necesarios consecutivos [20] [24] [25], ver ejemplo en la figura 2.1.



Figura 2.1. Ejemplo de funcionamiento del algoritmo First Fit. Adaptada de [25].

- **Random fit (RF).**

En este esquema de asignación, cuando una solicitud que llega a la red y para su conexión requiere dos *slots* como se ve en la figura 2.2, el cual realiza una búsqueda de *slots* consecutivos disponibles que cumplan con los requisitos de la solicitud de conexión y los asignan de manera aleatoria [24] [25].

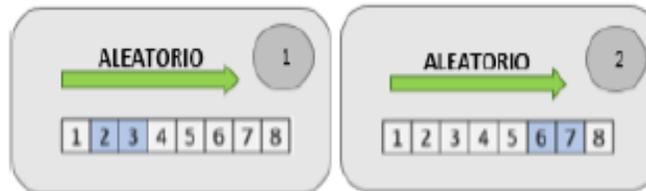


Figura 2.2. Ejemplo de funcionamiento del algoritmo Random Fit. Adaptada de [25].

- **Last fit (LF).**

En este esquema de asignación de espectro, funciona de manera opuesta al algoritmo FF ya que siempre intenta asignar los *slots* de forma descendente, es decir, cuando una solicitud de conexión que requiere dos *slots* la cual tiene que ser atendida, ver Figura 2.3, este algoritmo elige los slots consecutivos necesarios desde el *slot* identificado con el índice más alto hacia el más bajo, dicha conexión se coloca en la banda espectral más pequeña disponible a lo largo de la primera ruta encontrada [25].



Figura 2.3. Ejemplo de funcionamiento del algoritmo Last Fit. Adaptada de [25].

- **Exact fit (EF).**

Este esquema de asignación de espectro busca seleccionar desde los *slots* disponibles, el bloque exacto de los *slots* solicitados por la conexión. Así, si hay un bloque de espectro que coincide con el tamaño exacto de los recursos solicitados, se asigna ese espectro. En caso contrario, el espectro es asignado de acuerdo con el algoritmo First Fit [25] [31].

- **Péndulo.**

Este algoritmo de asignación de espectro, desarrollado en la Universidad del Cauca, realiza un movimiento pendular que recorre la rejilla espectral desde sus extremos alternados hacia su centro, en busca de los *slots* necesarios para atender el requerimiento de conexión [37]. La Figura 2.4 muestra el funcionamiento del algoritmo para atender una conexión que requiere dos *slots* (25 GHz) de una rejilla de 100 GHz (8 *slots*).

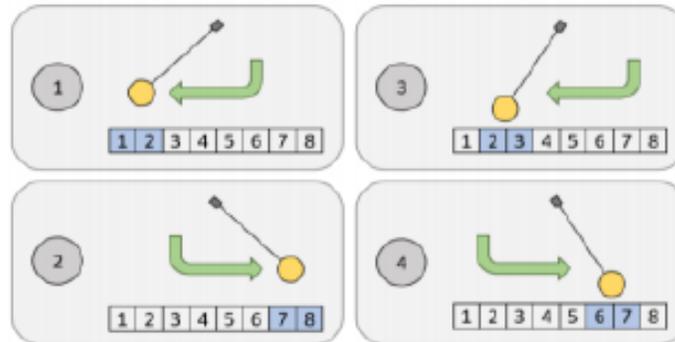


Figura 2.4. Ejemplo de funcionamiento del algoritmo péndulo. Tomada de [37].

De este modo, en principio, el algoritmo examina si los *slots* con en el índice más bajo están disponibles (paso 1), si no lo están, comprueba los últimos *slots* de la rejilla (paso 2), pero si tampoco encuentra disponibles los *slots* necesarios, inicia un nuevo ciclo de revisión a partir del segundo *slot* con índice más bajo (paso 3), y si tampoco están disponibles los *slots* necesarios, comprueba los últimos a partir del penúltimo *slot* (paso 4). El algoritmo, continúa de esta manera hasta que llega a su centro o hasta que encuentra los *slots* necesarios para atender la solicitud. Dado el caso en que no se encuentren *slots* disponibles, la solicitud es rechazada [37].

2.2. Herramientas de simulación.

Una herramienta o software de simulación permite analizar características de la red para interpretar de mejor manera el funcionamiento de distintas tecnologías previo a ser implementadas; permitiendo evaluar el desempeño a nivel físico de la red FTTH-EON, con base en los parámetros de monitoreo de desempeño óptico (OPM) mediante la simulación de escenarios de aplicación bajo varias condiciones y parámetros que permitan desarrollar los objetivos propuestos. Para cumplir con esto, la Universidad del Cauca cuenta con diferentes herramientas para su estudio, a continuación, se analizaron las principales herramientas de simulación a fin de elegir la herramienta que permita cumplir con los alcances planteados para llevar a cabo el desarrollo de este trabajo de grado.

2.2.1. MATLAB.

Es una herramienta de software y lenguaje de programación de alto nivel desarrollado por *MathWorks*, la cual cuenta con una herramienta de simulación y diseño basado en modelos llamada *Simulink* (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario). Además de la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. No solo sirve para modelar y simular, sino también para generar automáticamente el código de un modelo y efectuar pruebas de manera anticipada o frecuente, lo que resulta muy útil para la modelación y simulación de sistemas, entre los cuales están los de telecomunicaciones. En la Figura 2.5 muestra el logo de herramienta [38].



Figura 2.5. Logo de la herramienta Matlab. Tomada de [38].

2.2.2. OMNeT ++.

Es un entorno de desarrollo integrado que permite la simulación de redes de datos en diferentes sistemas operativos como Windows, Unix, Mac, entre otros. *OMNeT ++* agrega funcionalidades basado en una construcción modular y de arquitectura abierta a través de componentes simples o compuestos que pueden ser desarrollados mediante lenguaje NED y programados mediante el lenguaje orientado a objetos C++. *OMNeT ++* se ha utilizado en numerosos ámbitos de investigación, desde la simulación de redes basadas en colas de espera, arquitectura de hardware, tecnologías móviles, inalámbricas, redes ATM, TCP/IP, redes ópticas, entre otras [39]. En la Figura 2.6 muestra el logo de la herramienta.

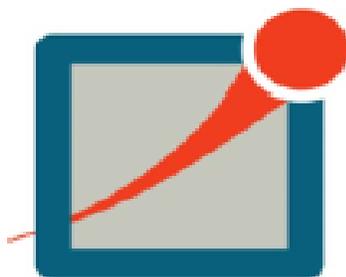


Figura 2.6. Logo OMNET++. Tomada de [39].

2.2.3. OptiSystem.

System Design Software, desarrollada por *Optiwave Systems*, una de las últimas versiones de la colección de diseño de sistemas de comunicaciones ópticas. Esta proporciona un gran número de nuevas características las cuales facilitan la simulación y diseño de tecnologías emergentes en sistemas de comunicaciones ópticas. *OptiSystem* es una herramienta software de diseño de redes ópticas, que permite a los usuarios planear, simular y evaluar casi cualquier tipo de enlace óptico en la capa de transmisión, desde el nivel de componente hasta el nivel de sistema, en esta herramienta es posible realizar diferentes opciones de diseño de redes (OTDM, CWDM, DWDM, PON, OCDMA, entre otras). Además, esta herramienta presenta de una manera visual el análisis de escenarios [40]. En la Figura 2.7 muestra el logo de la herramienta.



Figura 2.7. Logo de la herramienta OptiSystem. Tomada de [40].

2.2.4. OptSim.

OptSim es una herramienta de simulación y modelado de RSoft adquirida por *Synopsys*, empleada para el diseño y simulación de sistemas de comunicación ópticos, la cual permite la simulación de sistemas complejos con un alto grado de eficiencia y precisión como lo son sistemas WDM, DWDM, CWDM con amplificación óptica (EDFA, RFA, SOA), sistemas de Acceso Múltiple por División de Código en el entorno Óptico OCDMA (*Optical Code Division Multiple*

Access), redes basadas en Multiplexación por División de Tiempo Óptico OTDM (*Optical Time Division Multiplexing*), redes FTTx/PON, Espacio Libre Óptico FSO (*Free Space Optics*), Radio Sobre Fibra ROF (*Radio Over Fiber*) y enlaces fotónicos de microondas, e interconexiones ópticas.

Esta herramienta representa un sistema óptico de comunicaciones como un conjunto de bloques interconectados, donde cada bloque representa un componente en el sistema de comunicación. Ajustándose a un sistema óptico real donde la señal de datos es transportada entre los componentes del sistema en *OptSim*. Cada bloque o componente es simulado de manera independiente con base en los parámetros especificados definidos por el usuario en cada uno de ellos y la señal transmitida a estos desde otros bloques. En la herramienta, los bloques están representados gráficamente como iconos e internamente como estructuras de datos y algoritmos numéricos sofisticados para evaluar el desempeño del sistema.

OptSim proporciona una extensa librería con los componentes más comúnmente utilizados en sistemas de comunicaciones ópticas que actualmente se manejan en el mercado. Además, cuenta con la capacidad de análisis de desempeño con base en parámetros como BER, Factor Q, espectro de potencia, analizador de señal, diagrama del ojo con una selección completa de herramientas de medida como jitter, abertura del ojo, espectro electro/óptico, fase/frecuencia óptica instantánea, potencia, entre otras. con lo que se facilita el diseño de los sistemas ópticos y el análisis de los resultados que se producen a partir de su simulación [16] [17] [41] [42].

Además, *OptSim* define dos técnicas de simulación las cuales pueden ser utilizadas dependiendo del tipo de resultados que se deseen obtener: simulaciones en modo bloque, “la cual es la técnica de simulación tradicional” y simulaciones en modo muestra; “la cual es totalmente temporal, siendo la más fiel del mercado”.

En el modo bloque, la secuencia de entrada se evalúa por bloque hasta el punto de salida y es la más usada actualmente. Por otro lado, el modo muestra resulta útil para escoger entre diferentes tipos de variaciones en el diseño de un enlace de fibra óptica, este modo se implementa muestra a muestra, mejorando el uso de la memoria de la secuencia en cada punto de interés. En la figura 2.8, se observan las dos técnicas de simulación con las cuales cuenta la herramienta de simulación *OptSim*.

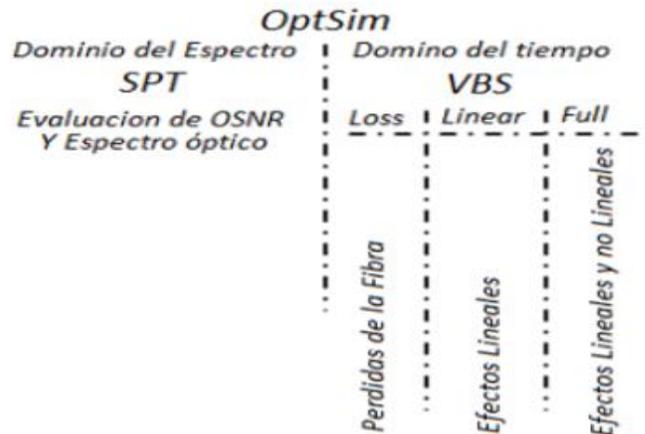


Figura 2.8. Técnicas de simulación de la herramienta OptSim. Tomada de [42].

- **Técnica de Propagación Espectral (SPT, Spectral Propagation Technique).**

Es una simulación en el dominio del espectro, donde las señales ópticas son propagadas como espectros de potencia. Los componentes SPT tienen en cuenta sus pérdidas o ganancias y generación de ruido; cada componente posee una función de transferencia que no tiene en cuenta las no linealidades de la fibra.

- **Técnica de Ancho de Banda Variable (VBS, Variable Bandwidth Simulation).**

Es una simulación en el dominio del tiempo sobre un ancho de banda variable proporcionado por el usuario. Las señales son propagadas a través de las redes como muestras en el dominio del tiempo, esta técnica es utilizada para simular efectos lineales y no lineales tanto para componentes ópticos como eléctricos, siendo este el núcleo del entorno de OptSim.

Una característica de gran importancia que tiene esta herramienta de simulación es que se basa en la interconexión de componentes modulares, los cuales pueden ser usados en conjunto con Matlab, en lo que se conoce como entorno co-simulado. Además, cuenta con una extensa librería de componentes para el diseño y modelamiento, que incluye dos redes básicas FTTH-PON con soporte de servicios de datos Triple play (VoIP y video) ya diseñadas con sus respectivos nodos o módulos como lo es el ONT y el OLT, con parámetros establecidos por defecto por parte de la herramienta, la cual permite ser una referencia para la implementación de las topologías de red que proporcionen estos servicios y así evaluar el desempeño óptico donde se tendrán en cuenta los parámetros de monitoreo óptico en el presente trabajo de investigación [42] [43].

Las características expuestas anteriormente son adecuadas con los objetivos del presente trabajo de grado, ya que OptSim el cual es uno de los principales enfoques por el que se realiza el presente trabajo de grado, es la cosimulación con la herramienta Matlab. Esta interfaz permite a los usuarios de OptSim ejecutar simulaciones Matlab que interactúan completamente con la estructura de datos OptSim y que conlleva a una simulación conjunta y teniendo en cuenta que la Universidad del Cauca dispone actualmente de la licencia de *OptSim*, se ha definido trabajar exclusivamente con dicho entorno de simulación y el entorno de Matlab para el diseño del algoritmo del presente trabajo de investigación, además que *OptSim* es una herramienta amigable, fácil de estudiar y manejar en poco tiempo [42] [43]. En la Figura 2.9 muestra el logo de la herramienta.



Figura 2.9. Logo de la herramienta OptSim. Tomada de [43].

A Continuación, en la tabla 2.1 se presenta un cuadro comparativo de las principales características que presenta cada herramienta.

Características	OptSim	Matlab	OptiSystem	OMNeT ++
Interfaz gráfica	Alta	Alta	Alta	Medio
Lenguajes de programación	Bajo	Alta	Bajo	Bajo
Tipo de software	Simulador de propiedades ópticas	Matemático	Simulador de propiedades ópticas	Simulador de propiedades ópticas
Complejidad de manejo	Medio	Alta	Medio	Medio
Integración con otras herramientas	Si	Si	Si	si
Licencia	Comercial	Comercial	Comercial	Gratuita
Requisitos del sistema	Windows y Linux	Unix, Windows, MAC OS y Linux	Windows	Windows, Unix

Tabla 2.1. Cuadro comparativo de las herramientas de simulación.

2.3. Monitoreo del desempeño óptico OPM (Optical Performance Monitoring).

Debido al auge de la tecnología y el crecimiento exponencial de usuarios en los nuevos servicios y aplicaciones en telecomunicaciones que demandan grandes cantidades de tráfico de datos al que se ve sometido la red en los últimos años, se hace necesario un aumento del ancho de banda que permita suplir las necesidades de los diferentes usuarios. Lo anterior, conlleva a monitorear, gestionar y corregir fallas presentes en el funcionamiento de la red óptica, la cual debe estar en capacidad de evaluar y reparar dinámicamente el estado y calidad de las señales de los diferentes servicios [42].

Con el fin de monitorear y gestionar el estado de los recursos que proporciona la red, se hace necesario utilizar una metodología que define una serie de Parámetros para el Monitoreo Óptico (OPM, Optical Performance Monitoring). Si bien, existen diferentes tipos de parámetros que describen la transmisión a través de un enlace de fibra óptica, los cuales se pueden catalogar como “parámetros que afectan la calidad de la señal óptica” [17]. Tomando como referencia los parámetros de acuerdo con la recomendación ITU-T G.697 [44], estos parámetros permiten evaluar el desempeño de una red EON con arquitectura FTTH, considerados en la capa de la calidad de la señal, los cuales son: Diagrama del ojo, Relación señal a ruido óptica (OSNR), Tasa de Error de Bit (BER), Factor Q (estrechamente ligado a la BER), Jitter, entre otros, los cuales brindan información relacionada a la calidad de la señal óptica.

OPM resulta de gran importancia para realizar un correcto monitoreo del canal óptico en el presente trabajo de investigación por el hecho de estar conformado con servicios digitales, como por ejemplo Internet, VoIP y video, pero cuando el servicio Triple Play está conformado por el servicio analógico se debe considerar otro tipo de método para evaluar los parámetros adicionales, tales como: longitud de onda de cada canal, potencia por canal DWDM, y potencia total en la fibra, que conciernen a las características analógicas de la señal óptica y no a las digitales, como: BER, factor Q, jitter o dispersión, las cuales se pueden ser monitoreadas usando OPM ya sea convencional o avanzado [45].

Dentro de los efectos que afectan la transmisión de las señales en la fibra óptica y que se consideran como parámetros que degradan la calidad de la señal limitando su desempeño, las cuales son [17]:

- Atenuación: Disminución de la potencia de la señal (haz de luz), a medida que la señal se propaga a través de la fibra.
- Dispersión: Ensanchamiento de los pulsos de luz a medida que viajan por la fibra.

- Efectos no lineales: Efectos acumulativos producto de la interacción del haz de luz con el material por el que viaja.

Por último, en este trabajo de grado se abordan de forma exclusiva los parámetros de monitoreo óptico de acuerdo con [17] los cuales se describen a continuación:

2.3.1. Factor Q.

El factor de calidad Q, se utiliza para determinar el desempeño de un sistema de comunicaciones óptico, es decir, se define como la relación señal a ruido eléctrico que se mide en la entrada de un circuito de decisión en un receptor digital. Su medida está en función de las medias y varianzas de las intensidades de corriente en el decisor del receptor que representan los niveles de los diferentes símbolos recibidos. Para sistemas que utilizan modulación binaria, la medida del factor Q se expresa en la siguiente ecuación:

$$Q[dB] = 20\text{Log}\left(\frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 - \sigma_0}\right)$$

Ecuación 5. Factor Q.

Donde I y σ representan la media y la varianza, ya sea de un uno lógico o de un cero lógico transmitido respectivamente.

I_0 = Nivel medio de tensión de nivel cero.

I_1 = Nivel medio de tensión de nivel uno.

σ_0 = Desviación típica de la distribución de ruido en el nivel cero.

σ_1 = Desviación típica de la distribución de ruido en el nivel uno.

2.3.2. Tasa de error de bit (BER, Bit Error Rate).

La tasa de error de bit es un parámetro que evalúa la calidad de la información recibida en el sistema, y se representa mediante la relación entre el número de bits que se han transmitido erróneamente respecto al número total de bits transmitidos en un determinado periodo de tiempo. La señal usualmente es afectada por fenómenos como: dispersión, incremento de ruido, efectos no lineales en el medio de transmisión óptico, entre otros. Estos efectos negativos, se pueden contrarrestar usando métodos, diseños y técnicas, como por ejemplo incremento de la potencia, reducir pérdidas en la fibra, mediante el uso de amplificadores. Así mismo, su medida se puede expresar en términos del factor de calidad Q para dar un valor aproximado de la BER si se considera un sistema modelado bajo un canal AWGN, y que no emplee modulación multinivel, en este

caso el factor Q y la BER están relacionadas mediante la siguiente ecuación:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)$$

Ecuación 6. Tasa de error bit.

Donde, $\operatorname{erfc}(x)$ es la función complementaria de error para distribuciones gaussianas.

2.3.3. Relación señal a ruido óptica (OSNR).

La relación señal a ruido (OSNR, *Optical Signal Noise Ratio*), se define como la medida de la relación de potencia de la señal con respecto a la potencia de ruido en un canal óptico. La OSNR, es un parámetro muy importante el cual indica que tanto se degrada una señal óptica transmitida en un sistema debido a múltiples atenuaciones. La OSNR puede calcularse mediante la ecuación.

$$OSNR = 10 \log \frac{P_i}{N_i} + 10 \log \frac{B_n}{B_r}$$

Ecuación 7. Relación señal a ruido.

P_i = Potencia óptica de la señal.

B_n = Ancho de banda equivalente de ruido.

N_i = Valor promedio de la potencia de ruido.

B_r = Ancho de banda óptico de referencia, con un valor típico de 0.1nm.

La medida de la OSNR depende de factores como la sensibilidad del receptor, sino se tiene en cuenta este parámetro, la medida puede ser errónea [17] [46] de esta manera los factores que la afectan son:

- Formato de modulación.
- Velocidad de transmisión.
- Potencia a la salida de los amplificadores.
- Dispersión en la fibra óptica.
- Ancho de banda.
- Espaciamiento entre canales.

2.3.4. Diagrama del ojo.

El diagrama del ojo es un esquema que ilustra la superposición de distintas combinaciones de unos y ceros que se transmiten sobre un canal en un periodo de tiempo determinado, lo cual permite observar ciertos parámetros de medición como la BER y el factor Q y características que determinan la calidad de la señal,

tal como se ilustra en la Figura 2.10.

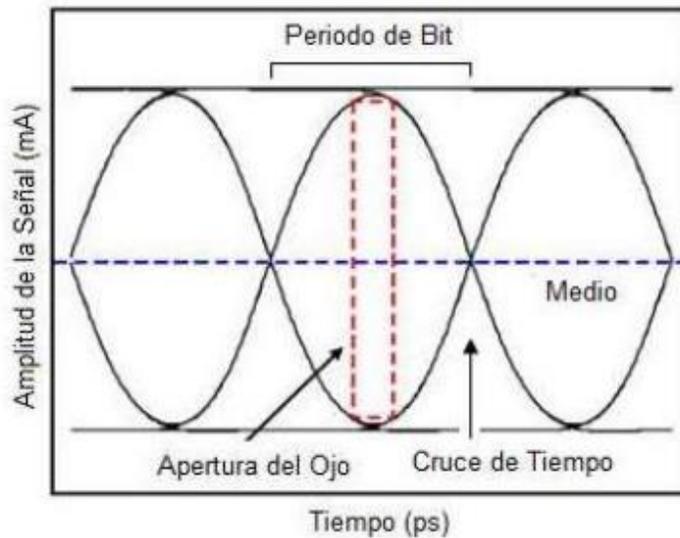


Figura 2.10. Parámetros del diagrama del ojo. Tomado de [47].

En el diagrama del ojo, se pueden identificar dos elementos principales: El cruce de tiempo que equivale al instante donde se produce el cierre o la apertura del ojo, y el cruce de amplitud, que corresponde al nivel de tensión que produce la apertura o el cierre del ojo definiéndose en el periodo de bit.

Mediante el diagrama del ojo se pueden conocer algunas fuentes de degradación en del canal óptico, a partir de dos tipos de comportamiento; en primer lugar, si la apertura vertical es pequeña la calidad del sistema se ve comprometida por efectos como la atenuación y la ISI y el margen de ruido que inciden en la amplitud de la señal, en segundo lugar, si la apertura horizontal (Eje de tiempo) es pequeña la calidad del sistema se ve afectada por el jitter y el sincronismo sobre la señal.

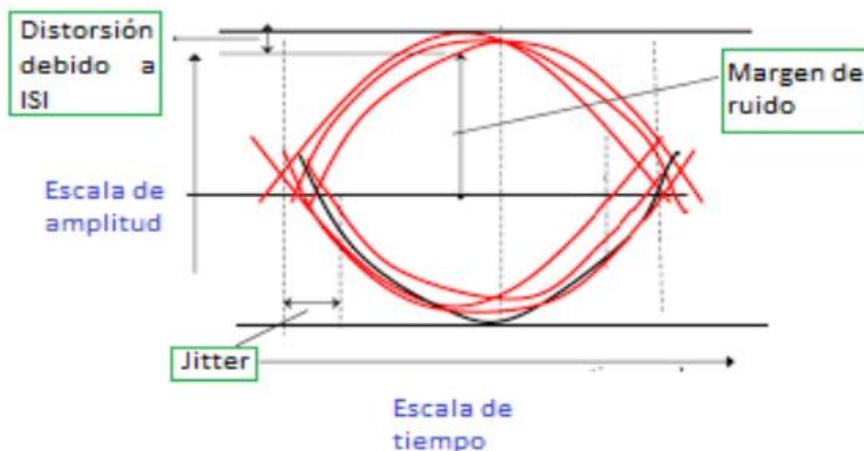


Figura 2.11. Efectos de distorsión, Jitter y margen de ruido. Tomada de [16].

2.3.5. Jitter.

El Jitter puede considerarse una degradación óptica porque OPM lo define como un daño de transmisión óptica, el efecto del Jitter se refiere a la desviación de fase de una señal óptica que se propaga sobre un canal con respecto a su posición ideal en el dominio del tiempo, y se calcula en función de la desviación estándar de un histograma que contenga las diferentes formas de pulso transmitidas. El Jitter es un efecto no deseado que degrada la calidad y desempeño del sistema, debido a que puede generar efectos de ISI por el desplazamiento de fase que genera, haciendo que los pulsos se traslapen entre sí, y haciendo imposible, en algunos casos, el reconocimiento de la información digital en el receptor. Por esta razón, los sistemas de comunicaciones deben manejar un margen de tolerancia de Jitter, con el fin de que los transmisores y receptores del sistema puedan trabajar de manera adecuada.

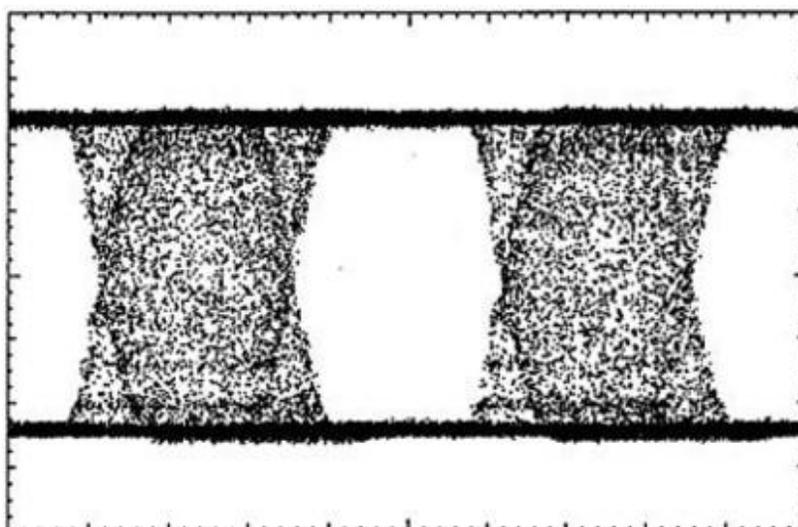


Figura 2.12. Efecto pronunciado de Jitter en el diagrama del Ojo. Tomado de [16].

2.4. Metodología de investigación.

La metodología escogida para el desarrollo del presente trabajo de investigación se basa en el modelo lineal secuencial o también llamado modelo en cascada ver figura 2.13 (ciclo de vida de este modelo), la cual tiene una clara definición de sus fases y actividades que permiten detallar el problema y desarrollar la investigación de manera adecuada. Además, se destaca que esta metodología hace parte de los paradigmas más antiguos y utilizados para el desarrollo de soluciones de software dentro de la academia.

Modelo de la cascada

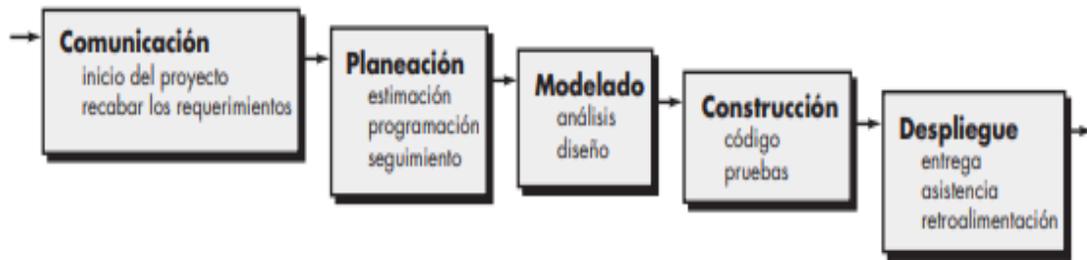


Figura 2.13. Modelo en cascada. Tomada [48].

El modelo en cascada está conformado de cinco fases, que van sucediendo a medida que se van completando los requisitos para cada una de ellas, lo cual permite un progreso claro y ordenado. A continuación, se detallan cada una de las fases del modelo [48].

Fase de recopilación de información: El objetivo de esta fase es comprender las necesidades finales del proyecto para poder plantear claramente todos los requerimientos funcionales del mismo.

Fase de planeación: En esta fase el proyecto se divide en partes más pequeñas que puedan desarrollarse por separado o de forma más sencilla.

Fase de diseño o modelado: En esta fase se diseña el entorno de simulación y los algoritmos que permiten dar una solución al problema de investigación planteado inicialmente en el trabajo de grado.

Fase de construcción: En esta fase se implementan los algoritmos desarrollados en el entorno, se realizan pruebas de funcionamiento y desempeño y se recopilan los datos necesarios.

Fase de despliegue: En esta fase se analizan los resultados obtenidos, se retroalimenta con el director y se realizan las últimas correcciones para finalizar el proyecto de investigación y posteriormente entregarlo.

2.5. Metodología de simulación.

Para realizar el estudio de la evaluación del desempeño de los modelos de red se acude a la información incluida en el documento “Ingeniería del software, un enfoque práctico” [48]. donde se establecen unos lineamientos que permiten llevar a cabo la simulación del desempeño de manera adecuada, la cual contiene una serie de pasos o etapas las cuales pueden adaptarse a nuestro entorno y sus condiciones de funcionamiento.

En concordancia con [48], una metodología tiene distintas etapas que permiten modelar y simular cualquier sistema de comunicaciones. De acuerdo con la ingeniería del software, se presenta un modelo que ha sido adaptado para desarrollar las fases propuestas dentro de la metodología y sus etapas de la siguiente manera:

Definición del sistema (escenarios de prueba): caracterizar los componentes de la red de prueba y el entorno de simulación mediante un análisis preliminar en el que se identifiquen tanto las relaciones como las restricciones y las variables involucradas en la red del sistema planteado, que sirvan para realizar la evaluación y el análisis del desempeño a nivel físico de una red de acceso FTTH-EON, para un enlace de bajada, en la prestación de servicios Triplay mediante la implementación de un algoritmo de asignación dinámica de espectro.

Formulación del entorno (modelo de prueba):

Este proceso consiste en desarrollar la representación del sistema que se va a implementar para el escenario de prueba, teniendo en cuenta sus componentes y los parámetros que afectan su comportamiento ya que un buen diseño conduce a crear un ambiente que se adecue a los requerimientos que permita la obtención de los resultados propuestos en la pregunta de investigación.

Recolección de datos: Se debe identificar y definir los datos más relevantes los cuales se requieren en el entorno de simulación para obtener los resultados deseados.

Implementación del entorno: Se debe implementar y/o adecuar en la herramienta de simulación elegida las etapas anteriormente mencionadas con lo cual se realizará la asignación de espectro óptico dentro del modelo de red de prueba y analizar su desempeño, y realizar una comparación con otro algoritmo o método convencional que emplean las EON.

Prueba y validación: Determinar falencias en la formulación del entorno o las variables involucradas lo cual permitirá determinar el comportamiento de la red bajo características propias de las EON.

Interpretación: Una vez realizadas las pruebas se debe analizar los resultados con el fin de proporcionar retroalimentación al entorno y corregir posibles errores para obtener mejores resultados en el sistema propuesto.

Documentación: En esta etapa se debe incluir una descripción del procesamiento e interpretación de los datos evaluados y del entorno desarrollado, con el fin de verificar los resultados obtenidos.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo que sintetiza la metodología de simulación para el proyecto de investigación.

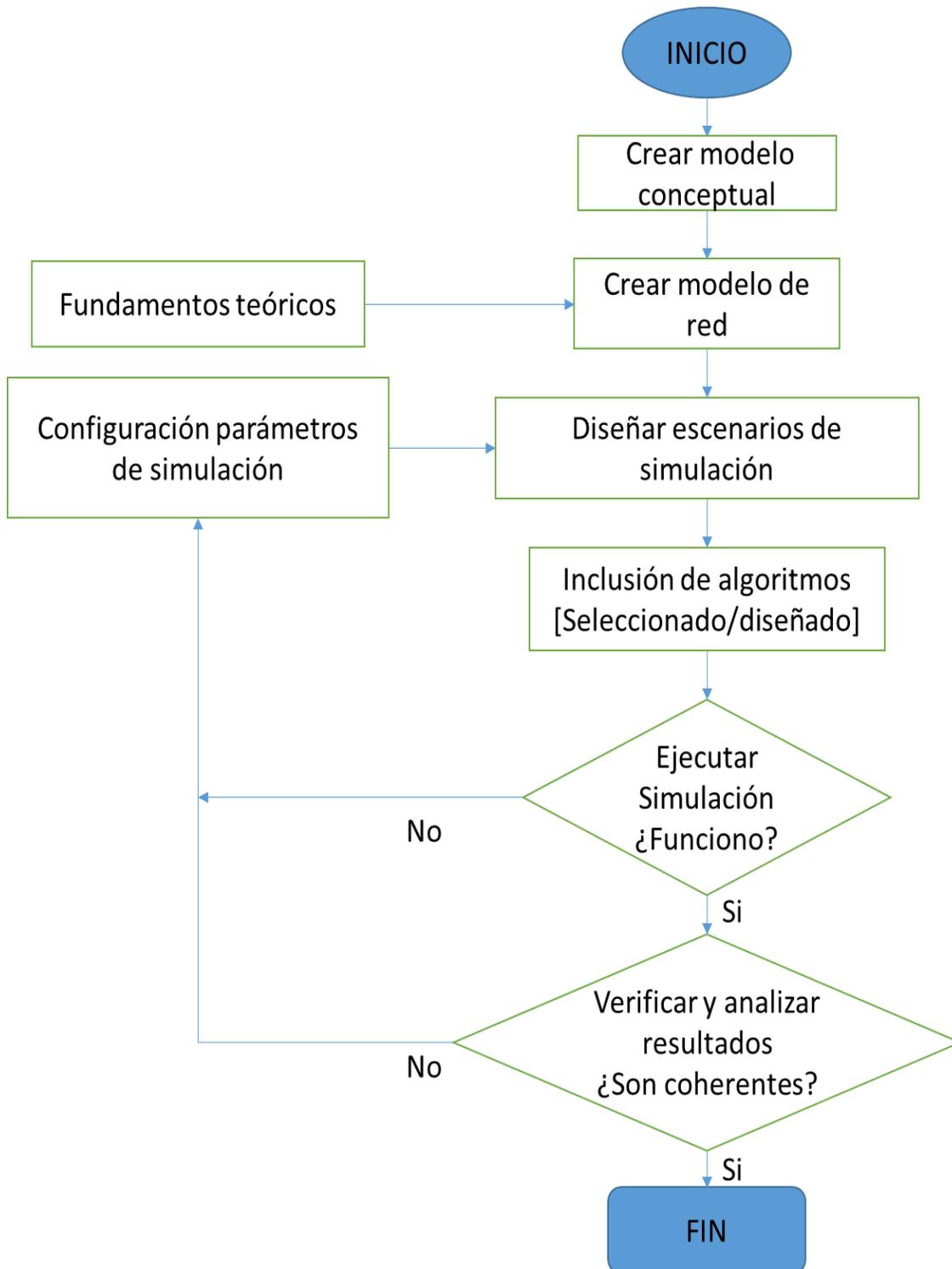


Figura 2.14. Diagrama de flujo de la metodología de la simulación.

CAPÍTULO III. Desarrollo e implementación del entorno de simulación.

3.1. Definición del escenario de simulación.

La red característica que permita obtener los resultados de forma precisa y dar cumplimiento a los objetivos planteados en este trabajo de investigación, se terminan de definir en este capítulo, como un modelo conceptual de la red y posteriormente un modelo de abstracción de la realidad del entorno *OptSim*, el cual permite realizar la evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-EON para servicios Triple Play al integrar un módulo Matlab el cual contendrá el algoritmo para la asignación dinámica de espectro.

En la figura 3.1, se muestra el esquema compuesto por una Red FTTH-GPON que soporta servicios Triple Play a la cual se le va a añadir un algoritmo de asignación dinámica de espectro para darle las características principales de una red EON. La red es modular y en el escenario de simulación propuesto se realiza la evaluación del desempeño con base en los parámetros OPM a nivel físico, con el fin de cumplir con los objetivos propuestos.

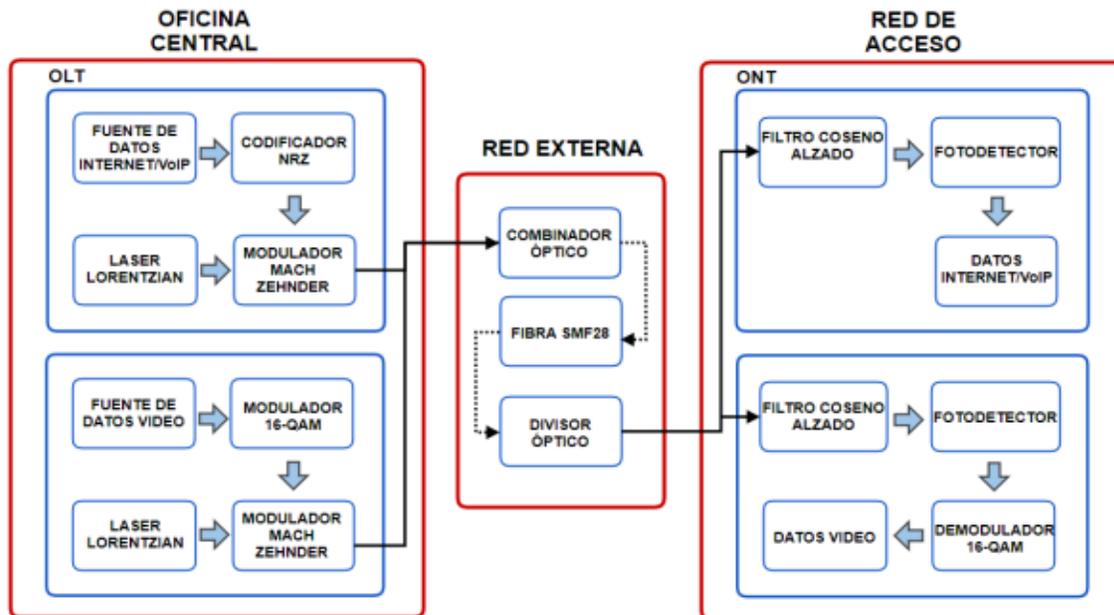


Figura 3.1. Diagrama general de la red FTTH/GPON Triple Play. Tomada de [12].

A continuación, se detalla el proceso del modelo conceptual de la red planteada, la OLT y ONT, respectivamente, del sistema que se pretende simular la transmisión de servicios de Internet, VoIP y video, tal como se observa en las Figuras 3.2 y 3.3, a partir de la base teórica expuesta en las sesiones anteriores, incluyendo recomendaciones de la ITU-T.

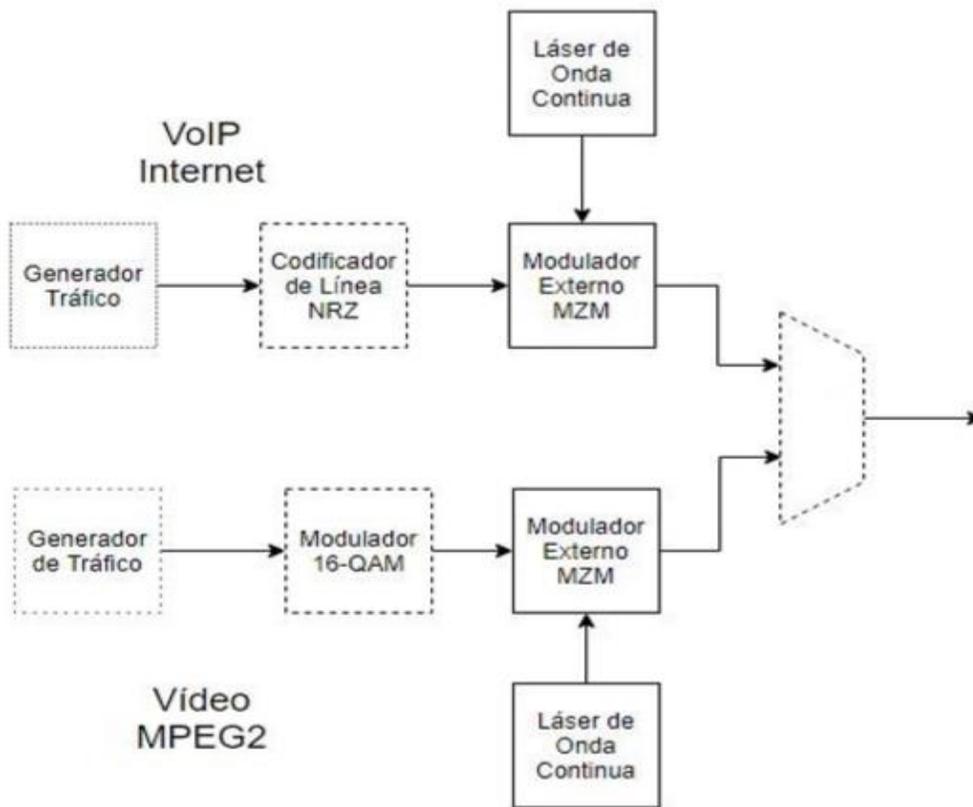


Figura 3.2. Modelo conceptual del terminal de línea óptico (OLT) dentro de la red FTTh-GPON Triple Play. Tomada de [13].

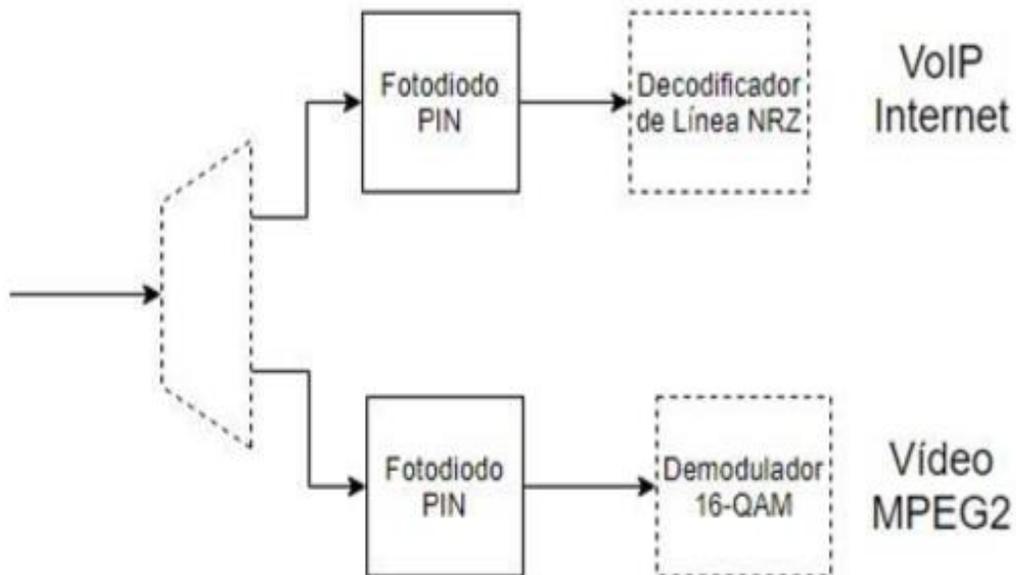


Figura 3.3. Modelo conceptual del terminal de red óptico (ONT) dentro de la red FTTh-GPON Triple Play. Tomada de [13].

El funcionamiento general de la red en el escenario de prueba es el siguiente: el servicio triple play es proporcionado como una combinación de señales que comprende Internet, VoIP y video. Los componentes (servicios) de Internet y VoIP operan de manera conjunta a una velocidad de transmisión de 1.25 Gbps, 2.5 Gbps y hasta 10 Gbps en la actualidad, la señal eléctrica proveniente del codificador de línea se modula externamente en banda base, y se transmiten en la ventana con longitud de onda de 1490 nm. Del mismo modo, la señal de vídeo, por su parte, se transmite hacia un módulo que efectúa un retardo en la señal para lograr una mayor sincronía en los pulsos enviados, esta señal es recibida por el componente de Modulación de Amplitud en Cuadratura, basado en 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) que se transmite en la ventana con longitud de onda de 1550nm. Cabe resaltar, que la escogencia de valores de las longitudes de onda de operación de los servicios triple play descritos se hace con base en las consideraciones de las recomendaciones ITU-T G.984.1 y ITUT G.984.5 [22][44].

Finalmente, estas señales de vídeo, voz y datos son combinadas en una nueva señal que se dirige hacia un divisor óptico por medio de Fibra Óptica Monomodo Estándar SSMF 28 (Standard Single Mode Fiber), la cual llega hasta la ONT[12], en donde un filtro coseno alzado interno es el encargado de eliminar interferencias ópticas alrededor de la longitud de onda que contiene la información, seguidamente el fotodetector de la ONT es quien recibe y transforma la señal OE, adquiriendo así el servicio de voz y datos. Del mismo modo, la señal de información de video se procesa con un filtro Bessel el cual se encarga de eliminar las frecuencias indeseadas, para finalmente procesar la señal de información a través del demodulador 16-QAM y así poder decodificar nuevamente en una cadena de bits que representa la información del canal de video enviado a la ONT.

A continuación, se detalla las características de cada módulo de la red FTTH-GPON Triple Play, valores y parámetros ilustrados anteriormente en las Figuras 3.2 y 3.3 de manera generalizada, ya que más adelante se detallarán los parámetros de configuración con los que se simulará.

1. Topología de red.

La red presentada funciona a partir de una topología de red en árbol, la cual brinda el mayor rendimiento. Dicha topología se realiza con la variable de cobertura, la cual está en función de la fibra troncal y la fibra que se despliega desde el splitter hacia las ONTs.

2. Subsistema de transmisión.

A. Servicio de VoIP e internet:

- ❖ Generador de trafico:

- Velocidad de transmisión de datos 2.5Gbps, establecida con base en las velocidades típicas de downlink que propone el estándar GPON.
- ❖ Codificador de línea:
 - Formato: Non Return to Zero (NRZ), definido con base en las consideraciones del estándar GPON.
- ❖ Modulador Óptico:
 - Tipo: Externo (Mach-Zehnder).
- ❖ Láser:
 - Tipo: Láser de Onda Continua
 - Longitud de onda: 1291 nm hasta 1591 nm
 - Potencia: 0 dBm para datos

B. Servicio de video:

- ❖ Generador de tráfico:
 - Velocidad de transmisión de datos: 0.8 Gbps
- ❖ Modulador Banda Base:
 - Tipo: QAM. 16 símbolos
- ❖ Láser:
 - Tipo: Láser de Onda Continua
 - Longitud de onda: 1291 nm hasta 1591 nm
 - Potencia: 8 dBm para video

3. Subsistema multiplexor/demultiplexor.

- ❖ Filtro Óptico:
 - Tipo: Bessel
 - Orden: 2
- ❖ BW:
 - El ancho de banda equivale a cuatro veces la velocidad de transmisión de datos, es decir un valor= 3.5 Ghz, para 0.8 Gbps, valor= 5 Ghz, para 1.25 Gbps, valor= 10 Ghz, para 2,5 Gbps.

4. Subsistema de canal óptico.

- ❖ Fibra Óptica:
 - Tipo: SMF-28
 - Constante de atenuación: Función de la longitud de onda y

- el tipo de fibra.
- Constante de dispersión: Función de la longitud de onda y el tipo de fibra.

5. Subsistema de recepción.

- ❖ Fotodetector:
 - Tipo: PIN
 - Longitud de Onda: Desde 1291 nm hasta 1591 nm, corresponde a la utilizada con el láser.
- ❖ Filtro Eléctrico:
 - Tipo: Butterworth
 - Orden: 16

3.1.1. Modelo físico de la red FTTH-GPON.

En esta sección, se definen el modelo físico de la red, es decir, la caracterización de los modelos conceptuales descritos anteriormente, a través de la herramienta software OptSim sobre el cual se desarrollan las simulaciones, tal como se ilustra el diseño en las figuras 3.4, 3.5 y 3.6 de la red FTTH/GPON triple play, como escenario base, el cual puede comprender desde 1 ONT hasta un máximo de 32 ONT.

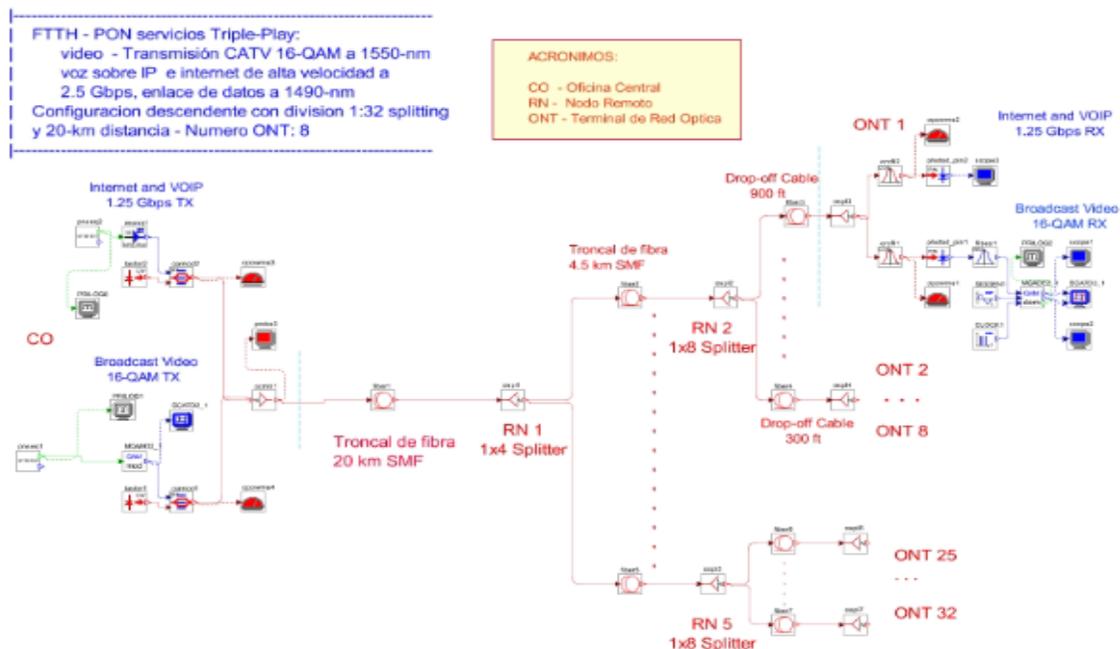


Figura 3.4. Modelo general en OptSim de la red FTTH/GPON para servicios Triple Play.

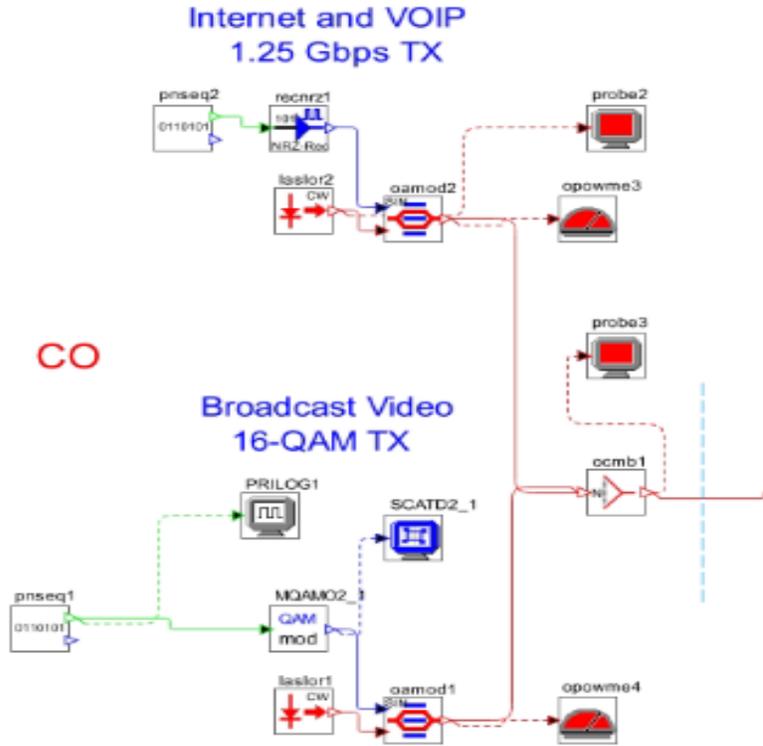


Figura 3.5. Componentes de la red para los servicios de voz, datos y video en la OLT, al interior de la oficina central (OC).

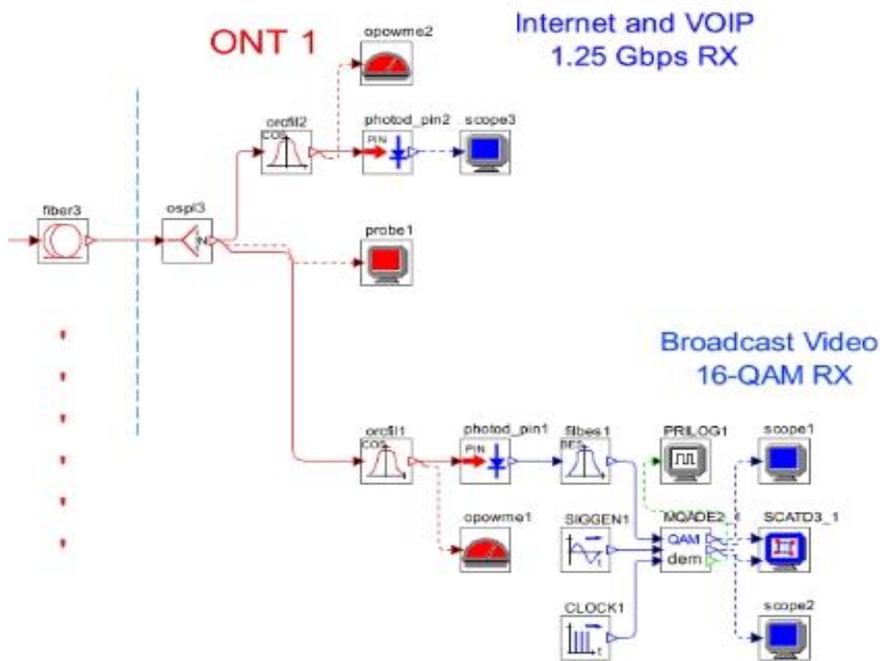


Figura 3.6. Elementos en el interior de cada ONT en la red de acceso.

A continuación, se hace una descripción de los parámetros definidos para llevar a cabo la evaluación del proceso de simulación de la red mostrada en la figura 3.4, mediante la configuración de los parámetros descritos en la tabla 3.1.

Parámetro	Valor
Servicio de Internet/VoIP	
Velocidad de Transmisión	2.5 Gbps
Longitud de Onda	1490 nm, Banda S
Potencia de Transmisión	0 dBm
Tipo de Modulación Óptica	Externa
Sensibilidad de Recepción	-27 dBm
Servicio de Video	
Formato de Modulación Multinivel	16-QAM
Velocidad de Transmisión	0.8 Gbps
Portadora	1000 Mhz
Tipo de Modulación Óptica	Externa
Potencia de Transmisión	8 dBm
Longitud de Onda	1550 nm, Banda C
Sensibilidad de Recepción	-16.3 dBm

Tabla 3.1. Parámetros técnicos establecidos para la implementación y simulación.

3.2. Inclusión del algoritmo en la red.

En este apartado se realiza la elección de uno de los algoritmos clásicos estudiados en el capítulo II, y, además, basados en el algoritmo de péndulo. Se procede a realizar proceso de diseño e implementación del algoritmo de asignación de espectro óptico para la prestación de servicios triple play en una red óptica incluyendo las características de las redes EON.

3.2.1. Algoritmo clásico exact fit (EF).

El algoritmo EF, es implementado para realizar la asignación de espectro buscando seleccionar desde los *slots* disponibles, el bloque exacto de los *slots* solicitados por la conexión. Así, si hay un bloque de espectro que coincide con el tamaño exacto de los recursos solicitados, se asigna ese espectro, repitiendo de esta manera el proceso. Por lo que es escogido para comparar y evaluar el desempeño del algoritmo diseñado en la red para la prestación de servicios triple play.

3.2.2. Algoritmo diseñado (Péndulo dinámico).

De acuerdo con [37] el algoritmo péndulo, realiza la asignación de espectro mediante un movimiento pendular recorriendo la rejilla espectral en busca de slots disponibles para la asignación de recursos en la red.

Este algoritmo de asignación de espectro se toma como base de estudio para implementar un algoritmo de asignación dinámica de espectro óptico en una red de acceso FTTH PON al incluir el enfoque EON para la prestación de servicios Triplay, el cual se incluye dentro del módulo Matlab de Co-simulación, desde donde se realiza la gestión de la red necesaria para el envío de los diferentes requerimientos de espectro solicitados por los usuarios finales. Por lo anterior, se incluye el algoritmo diseñado en este módulo.

Para realizar el nuevo diseño del algoritmo ha sido necesario estudiar la asignación de espectro de los algoritmos convencionales, que operan frecuentemente en las redes de este tipo, y comparar con el algoritmo de péndulo desarrollado en [37]. Por tal razón, se puede decir que la mayoría de los algoritmos hacen una búsqueda de la disponibilidad espectral en un solo sentido de la rejilla, es decir, el movimiento se realiza mayormente desde los slots de menor índice hacia los de mayor índice o algunos de forma aleatoria. Sin embargo, como se mencionó anteriormente el algoritmo de péndulo rompe con los esquemas tradicionales de la asignación del espectro, por esta razón fue seleccionado para continuar con esta línea de investigación.

Durante el análisis y búsqueda de un algoritmo capaz de realizar la asignación de espectro óptico de manera dinámica fue necesario el desarrollo de diversos modelos a lo largo del presente trabajo de investigación. Cada modelo viable fue implementado en la red y posteriormente simulado, para verificar su correcto funcionamiento en la asignación de los recursos, haciendo de esta etapa un proceso lento y complejo durante la investigación. Después de muchos ensayos y modificaciones, se logra obtener la mejor propuesta para la asignación de espectro de manera dinámica con lo cual la red adquiere el enfoque EON. Con lo cual, se procede a evaluar su comportamiento mediante pruebas de escritorio para posteriormente llevarla al simulador y verificar su operación.

De acuerdo con [37], el funcionamiento del algoritmo se resume como un movimiento pendular que recorre la rejilla desde sus extremos alternados hacia el centro, en busca de los slots necesarios para atender la demanda de ancho de banda en los servicios triple play. Como se observó en la figura 2,4 de la sección 2.1.3, un ejemplo del funcionamiento del algoritmo para atender un paquete o ancho de banda que ocupa dos slots correspondientes a 25 GHz, en una rejilla que posee una capacidad espectral de 100 GHz de ancho de banda es decir 8 slots.

A continuación, se detalla los pasos de operación del algoritmo.

- I. El algoritmo examina si los *slots* con en el índice más bajo están disponibles.
- II. Si no lo están, comprueba los últimos *slots* de la rejilla.
- III. En caso de no encontrar los *slots* necesarios, inicia un nuevo ciclo de revisión a partir del segundo *slot* con índice más bajo.
- IV. Y si tampoco están disponibles los *slots* necesarios, comprueba los últimos a partir del penúltimo *slot*.
- V. El algoritmo, continúa de esta manera hasta llegar al centro de la rejilla, o hasta que encuentra los *slots* necesarios para atender la solicitud. Dado el caso en que no se encuentren *slots* disponibles, la solicitud es rechazada.

De acuerdo con los pasos anteriores, el nuevo algoritmo diseñado que le dará las características principales a la red, incluye la misma lógica de asignación de espectro que péndulo, sin embargo, el nuevo diseño cuenta con la versatilidad de adaptarse a las necesidades del usuario mediante una asignación personalizada por servicio, es decir, si una ONT solicita el servicio de video, el algoritmo está en capacidad de realizar la asignación de ese único requerimiento. Con lo cual, logra hacer un uso eficiente del espectro óptico. De esta manera, se garantiza que el algoritmo recorre en forma de péndulo el espacio de la rejilla espectral, buscando en todas las posiciones posibles los slots necesarios para transmitir solo el servicio requerido por esa ONT.

El algoritmo diseñado recorre una rejilla que posee ocho y dieciséis slots de ancho de banda, los cuales corresponden a 100 y 200 GHz respectivamente. Y, asigna paquetes de tamaño equivalente a uno, dos o tres slots requeridos por el sistema. El algoritmo puede ser adaptado para operar sobre redes con una disponibilidad espectral diferente y paquetes de distinto tamaño, permitiendo así que sea altamente escalable y adaptable a las redes del futuro [37].

A continuación, se detalla el proceso para la elaboración del algoritmo implementado en una rutina de Matlab, para lo cual, se deben tener en cuenta ciertas características que permitan la correcta Co-simulación entre las herramientas Matlab y OptSim.

Para la elaboración del código, la herramienta OptSim cuenta con una serie de archivos importantes generados al crear el componente de Co-simulación, como se muestra en la figura 3.7. Donde está contenida toda la lógica del algoritmo diseñado. El archivo CCM_AlgorithmV2_VBS es un script de código en Matlab, el cual corresponde a la rutina principal, y contiene todos los archivos necesarios

para su funcionamiento. Mientras que el script `CCM_AlgorithmV2_VBSP` se usa para la pre simulación, es decir, prepara todos los parámetros, entradas y salidas ópticas del componente. Además, define el tipo de datos de la señal óptica que puede leer OptSim, y la potencia pico promedio de la señal. Por otro lado, este se encarga de preparar el archivo para el componente de Co-simulación.

Otros archivos que genera de forma automática el componente de Co-simulación, corresponde al archivo HTML, el cual es de ayuda para la documentación, llamado `CCM_AlgorithmV2_HELP`. Seguidamente, el `CCM_AlgorithmV2_SPT` para la simulación del editor del archivo de Matlab para la propagación del espectro.

Posteriormente se tiene el archivo `op_osgnr`: El cual lee un archivo de datos OptSim obtenido de la simulación de un componente óptico. Y para finalizar se tiene el archivo `op_osgnw`: el cual escribe un archivo de datos de señal a partir de variables Matlab que contienen la información de la señal.

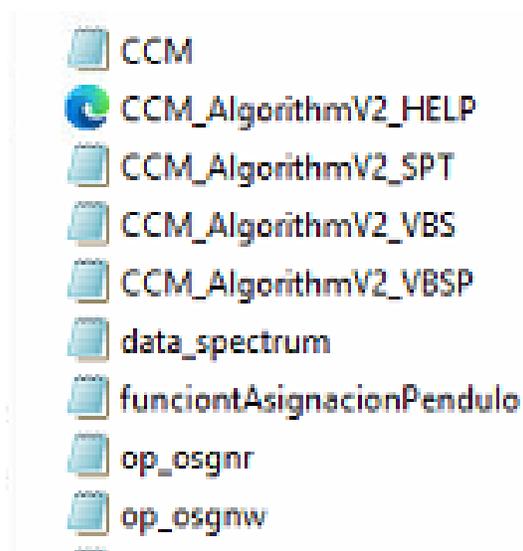


Figura 3.7. Archivos de configuración.

El pseudocódigo presente en la figura 3.8 corresponde al archivo VBS o archivo de simulación, el cual contiene las subrutinas necesarias para el funcionamiento.



```

1 BEGIN CONSIMULATION
2   LOAD Señales
3   SET Variables de entorno
4     ancho_slot;
5     tamaño_rejilla;
6     frecuencia_referencia;
7     indice_ont;
8
9   IF Reset == 1
10    PROCESS Resetear sistema
11      Eliminar archivos de estados de índices de los slots ocupados;
12      Eliminar archivos de frecuencias ocupadas y asignadas;
13      Eliminar variables de entorno;
14    END
15  END
16
17  IF Servicio == triple_play
18    FOR ancho_requerido = [12.5 25];
19      FUNCTION Asignación de frecuencia
20    END
21  ELSE Servicio = video
22    ancho_requerido = 25;
23    FUNCTION Asignación de frecuencia;
24  ELSE Servicio = voz ip/internet
25    ancho_requerido = 12.5;
26    FUNCTION Asignación de frecuencia;
27  END
28
29  PROCESS Sobre escribir el espectro óptico
30    FUNCTION op_osgnr(señal_asignada) de OptSim para cargar el estado del espectro;
31    FUNCTION op_osgnw(nueva señal) de OptSim para sobrescribir el espectro;
32  END
33
34 END

```

Figura 3.8. Pseudocódigo lógica algoritmo, archivo CCM_AlgorithmV2_VB.

Posteriormente, la acción a ejecutarse dependerá de los parámetros, es decir si la ONT solicita VoIP y video junto, el péndulo dinámico diseñado, asigna en primer lugar VoIP y luego pasará a asignar video, he aquí la primer ventaja, es decir, el algoritmo no necesariamente debe tener tres slots consecutivos, como inicialmente lo requiere péndulo, sino que por el contrario la lógica de este nuevo péndulo dinámico permite primero buscar y asignar VoIP el cual corresponde a un slot en cualquier campo de la grilla, una vez asignado, seguidamente busca asignar video que corresponde a dos slots en cualquier espacio disponible de la grilla, con esto pasamos de tener una demanda de tres slot consecutivos para garantizar el servicio triple play a tan solo un slot y dos slot consecutivo, de esta manera se garantiza el servicio triple play. Con lo cual, se cumple el ciclo del código tanto para VoIP como para video, en el mismo ciclo de código se ejecutará el archivo CCM, el cual es un archivo Matlab que contiene la lógica para la asignación de frecuencias, en la figura 3.9 se ve el pseudocódigo para esta asignación de acuerdo con un índice de frecuencias que corresponde a la asignación de la señal correspondiente para el envío del servicio solicitado por la ONT.

```

1  FUNCTION Asignación de frecuencia
2  PROCESS Encontrar slots requeridos para la conexión
3      slots_requeridos = ancho_requerido/ancho_slot;
4      FUNCTION Péndulo
5          Parámetros de entrada: slots_requeridos, tamaño_rejilla, indice_ont;
6          respuesta_slots_disponibles
7  END
8
9  IF Existen slots disponibles
10     Transformación de índices;
11     DEFINITION vector de índices de slots: A_origen = [-7,-6,...,0,...,8];
12
13     PROCESS Crear rejilla flexible
14         DEFINITION índices de la frecuencia central, resolución en slices
15             Conformación de slices en un vector B;
16             Conformación de slots equivalentes en un vector A;
17         END
18         Conformación de grilla completa [B;A];
19     END
20
21     PROCESS Encontrar índice de frecuencia central disponible
22         IF Índice de slot está en lado derecho
23             Asignar índice n equivalente
24         ELSE IF Índice de slot está del lado izquierdo
25             Asignar índice n equivalente
26         END
27
28     PROCESS Asignar la frecuencia CF en THz
29         CF = frecuencia_referencia + 0.00625*n;
30     END
31
32     IF Servicio es voz ip/internet
33         Asignar señal pregrabada correspondiente para voz ip/internet (n);
34     ELSE IF servicio es video
35         Asignar señal pregrabada correspondiente a video (n);
36     FIN
37
38     LOAD Archivos de frecuencias ocupadas y asignadas;
39     UPDATE Archivos de frecuencias ocupadas y asignadas;
40     RETURN una señal_asignada;
41 ELSE
42     MESSAGE No existen slots disponibles para la conexión;
43 END
44 END

```

Figura 3.9. Pseudocódigo asignación de frecuencias para los servicios hacia las OLT.

Ahora bien, dentro del archivo de simulación principal llamado CCM_AlgorithmV2_VBS, existe una línea de código llamada “ **CCM % Algorithm para asignar una frecuencia en un espacio disponible**” es donde nuevamente se realiza el llamado del archivo que contiene la frecuencia anteriormente asignada contenida en “*filename*” la cual contiene la señal de la frecuencia que posteriormente será asignada en la función *op_osgnr* con la cual se puede leer los archivos ópticos, una vez realizado este proceso, se inician los condicionales para guardar los estados de la información almacenada, es decir, donde se carga la señal para que las nuevas simulaciones tengan el último estado y así, entregar la información ordenada mediante la suma de todas las señales, que se verán reflejadas en el diagrama de espectro óptico en OptSim.

Finalmente se debe llamar a **CCM % Algorithm** donde entra el archivo **funciontAsignacionPendulo**, encargado de realizar la lógica para obtener el requerimiento de número de slot para los servicios, seguidamente se define la rejilla ya sea para 8 o 16 slot, para finalizar con la ejecución de la secuencia en el archivo de función de péndulo, terminando de esta manera con información

que indica la posición del slot tomado, el usuario que lo está ocupando, el tipo de servicio que solicitó y también los slots que quedan disponibles en la grilla. El pseudocódigo correspondiente se muestra en la figura 3.10. Todos estos datos son tomados por el archivo de simulación principal con el cual se hace la lógica e interacción de todas las partes y archivos involucrados en el desarrollo e implementación del algoritmo de péndulo dinámico para una red de acceso FTTH-EON para la prestación de servicios triple play.

```
1  FUNCTION Péndulo
2      LOAD Archivos de estados de índices de los slots ocupados
3      DEFINITION Vectores de índices disponibles;
4
5      IF Cantidad de slots requeridos es = 1
6          FOR Cada índice de slot verificar disponibilidad
7              Alternar lado izquierdo y lado derecho;
8              RETURN el primer slot que cumpla disponibilidad
9      ELSE IF slots requeridos = 2
10         FOR Cada par consecutivo de índices de slots verificar disponibilidad
11             Alternar lado izquierdo y lado derecho;
12             RETURN el primer par de slots consecutivos que cumplan la disponibilidad
13     ELSE IF slots requeridos = 3
14         FOR Cada tres slots consecutivos verificar disponibilidad
15             Alternar lado izquierdo y lado derecho;
16             RETURN la primera terna de slots que cumplan disponibilidad
17     END
18     RECORD Archivos de estados de índices de los slots ocupados
19     RETURN respuesta_slots_disponibles
20 END
```

Figura 3.10. Pseudocódigo función péndulo.

3.3. Entorno de co-simulación (Módulo Matlab).

3.3.1. Conexión co-simulación [42].

Se busca diseñar un módulo que permita realizar la asignación dinámica del espectro óptico, en una red de acceso para la prestación de servicios triple play. A su vez, el bloque que contiene el código es generado en la herramienta Matlab y posteriormente integrado en la herramienta OptSim con el fin de realizar el análisis correspondiente a la simulación del enlace total.

Para realizar la integración de estas dos herramientas, se hace uso de la configuración Custom Components que ofrece OptSim, la cual se describe a continuación:

Componente personalizado de matlab (*Custom Components*), es la forma mediante la cual se puede ampliar la biblioteca de componentes personalizados de OptSim, donde un programa ejecutable externo se convierte en un

componente OptSim administrado de manera transparente para todas las capacidades del editor y del simulador. Estos componentes se dividen en dos categorías: Custom Component para usar con MATLAB® (CCM), donde el programa externo es una rutina de Matlab y Custom Component Executable (CCE), donde el programa externo es un programa ejecutable genérico.

Dados los requerimientos y objetivos planteados, el presente trabajo de investigación se enfoca en el diseño del componente CCM, con el cual se creará un módulo de asignación dinámica de espectro, en la herramienta de simulación Matlab. (Ver anexo A, descripción de la integración y creación del componente CCM).

3.4. Modelo físico de la red FTTH-EON al integrar el módulo matlab.

Como se ha venido trabajando en este trabajo de investigación, a continuación, se define el modelo base de red al incluir el módulo Matlab en la herramienta OptSim, sobre la cual se desarrollan las simulaciones.

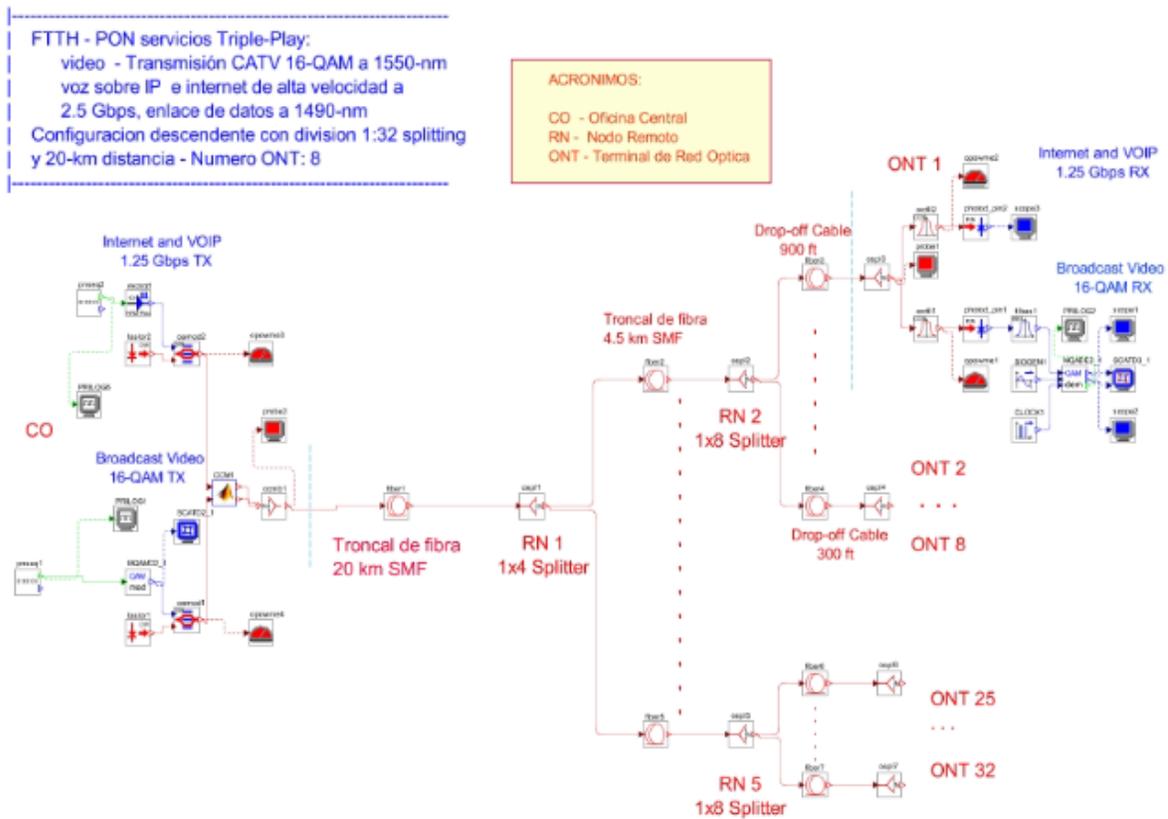


Figura 3.11. Escenario general.

3.4.1. Escenarios de simulación.

Para realizar la comparación entre el algoritmo exact fit modificado y péndulo dinámico, se proponen una serie de escenarios de simulación como se muestra en la tabla 3.2 que permitirá obtener un análisis comparativo mediante la variación de parámetros como lo es, velocidad de transmisión nominal de 1,25Gbps y 2.5Gbps, número de ONT, distancia y el tipo de algoritmo, estos parámetros se indican en la tabla 3.3, con el fin de evaluar el desempeño tanto del algoritmo como de la red Triple Play EON y dar cumplimiento a los objetivos propuestos.

Cabe resaltar que para el desarrollo y análisis de las simulaciones se tiene la siguiente convención para los servicios Triple Play:

- El servicio de audio y datos ocuparan un ancho de banda de 12,5 GHz equivalentes a un slot en la rejilla espectral.
- Los paquetes de servicio de video ocuparan un ancho de banda de 25 GHz, equivalentes a dos slots en la rejilla espectral.

Escenarios de simulación																
RED FTTH-EON Triple Play																
Casos de simulación																
Caso N° 1								Caso N° 2								
Red FTTH-EON Triple Play, Implementando Algoritmo Diseñado (Pendulo Dinamico)								Red FTTH-EON Triple Play, Implementando Algoritmo Clasico (Exact Fit Adaptado)								
Sub Casos de simulación																
Sub caso N° 1. Para 8 Slots				Sub caso N° 2. Para 16 Slots				Sub caso N° 1. Para 8 Slots				Sub caso N° 2. Para 16 Slots				
Caso de tercer nivel				Caso de tercer nivel				Caso de tercer nivel				Caso de tercer nivel				
Caso A		Caso B		Caso A		Caso B		Caso A		Caso B		Caso A		Caso B		
Velocidad de Transmision	1,25 Gbps	2,5 Gbps	1,25 Gbps	2,5 Gbps	1,25 Gbps	2,5 Gbps	1,25 Gbps	2,5 Gbps	1,25 Gbps	2,5 Gbps	1,25 Gbps	2,5 Gbps	1,25 Gbps	2,5 Gbps	1,25 Gbps	2,5 Gbps
Distancia	10 km		20 km		10 km		20 km		10 km		20 km		10 km		20 km	
Numero de ONT	1 ONT		1 ONT		1 ONT		1 ONT		1 ONT		1 ONT		1 ONT		1 ONT	
	4 ONT		4 ONT		4 ONT		4 ONT		4 ONT		4 ONT		4 ONT		4 ONT	
	8 ONT		8 ONT		8 ONT		8 ONT		8 ONT		8 ONT		8 ONT		8 ONT	
Los casos de estudio se simulan para cada una de las cargas de trafico especificadas en esta tabla																

Tabla 3.2. Escenarios de simulación propuestos.

A continuación, se detallan los casos de simulación propuestos en la tabla anterior.

Caso de simulación N°1.

En este caso la red operará con el algoritmo diseñado (péndulo dinámico) para la asignación dinámica del espectro óptico distribuido por Slots en la red.

Caso de simulación N°2.

En este caso la red operará con el algoritmo modificado (exact-fit) para la asignación dinámica del espectro óptico distribuido por Slots en la red.

Sub caso de simulación:

Sub caso N°1.

Para este caso la red dispondrá de ocho (8) slots de frecuencia para el envío de la información, lo que espectralmente corresponde a un ancho de banda de 100 GHz.

Sub caso N°2.

Para este caso la red dispondrá de dieciséis (16) slots de frecuencia para el envío de la información, lo que espectralmente corresponde a un ancho de banda de 200 GHz.

Casos de tercer nivel:

Caso A.

La velocidad de transmisión del enlace será de 1,25, para una distancia de 10 y 20 km y un número de ONT de 1, 4 y 8.

Caso B.

La velocidad de transmisión del enlace será de 2,5, para una distancia de 10 y 20 km y un número de ONT de 1, 4 y 8.

3.4.2. Configuración de los parámetros de simulación.

La tabla 3.3 contiene los valores fijados para la realización de los diferentes escenarios de simulación.

Parámetros de simulación		
Parametro	Variable	Valores
Cantidad de espectro	100 GHz
		200 GHz
Numero de Slots	m	8 Slot
		16 Slot
Velocidad de transmision	dataRate	1,25 Gbps
		2,5 Gbps
Distancia	distancia	10 km
		20 km
Numero de ONTs	ONT	1
		4
		8

Tabla 3.3. Parámetros de simulación.

3.5 Ejecución de las simulaciones.

Para la ejecución de las simulaciones, se parte del escenario base, la red expuesta en la figura 3.11 a la cual se le incluyen los parámetros descritos en la tabla anterior. Dado a la cantidad de escenarios, se analizará de manera general los escenarios de prueba diseñados, teniendo en cuenta las limitaciones de la herramienta OptSim y considerando los Parámetros del Desempeño de Monitoreo Óptico (OPM) a nivel físico, estipulados en la recomendación ITU-T G.697 [38] como lo es, BER, Factor Q y Jitter, adicionalmente se mostrara gráficamente como es el comportamiento de la asignación de espectro óptico al implementar el algoritmo propuesto y diseñado dentro de la red y finalmente verificar el funcionamiento de la misma en cada escenario con ambos algoritmos, cuyos resultados se estudian en el siguiente capítulo.

Como se describieron en el capítulo 3, sección 3.1, la red implementada está compuesta por tres sesiones que caracterizan a los sistemas ópticos, los cuales se nombran a continuación.

- A) Transmisor.
- B) Canal.
- C) Recepción.

Después de realizar las configuraciones de los elementos anteriormente mencionados, inicialmente se realiza una configuración Back to Back (OOK), como se observa en la figura 3.12, mediante la cual se consigue caracterizar la calidad de señal en el receptor, para ello se conecta el transmisor directamente al sistema receptor a través de un combinador de señales, llamado splitter, es de aquí de donde se obtienen las condiciones iniciales de funcionamiento del formato OOK con respecto a la BER, OSNR, Factor Q y los diferentes parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta en el presente trabajo de investigación. Los resultados obtenidos corresponden a las medidas en un enlace óptico ideal en el que no se consideran imperfecciones de canal, por tal razón serán considerados para realizar la grabación de las señales que se introducirán en el módulo Matlab con las que se van a trabajar durante el transcurso de la implementación y análisis del sistema FTTH- EON y los algoritmos propuestos, estos resultados que arrojen las simulaciones serán quienes determinen el comportamiento del sistemas como un patrón de referencia a la hora de analizar el desempeño de la red estudiada y sus algoritmos.

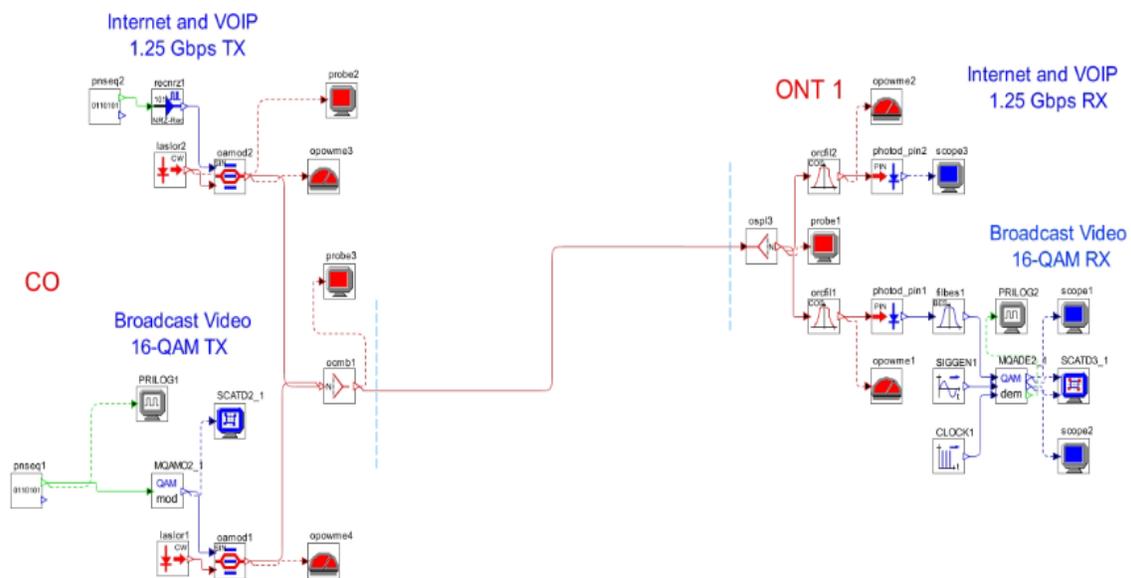


Figura 3.12. Enlace back to back red FTTH-EON.

Como se mencionó anteriormente los resultados correspondientes al enlace Back to Back se muestran a continuación y tomados como base del estudio ya que esta es la configuración con la cual se trabajará la señal a transmitir para la prestación del servicio Triple Play y la cual permitirán ofrecer un servicio aceptable para el estudio de la red y escenarios propuestos basados principalmente en la observación de los diagramas de ojo, diagrama de espectro, jitter, factor Q y constelación.

Como se aprecia en las siguientes figuras, 3.13, diagrama de ojo, la cual corresponde a la señal VoIP/datos en transmisión, en la figura 3.14 el diagrama de ojo para la señal de Video, seguidamente en la figura 3.15 la constelación correspondiente a señal de video y finalmente en la figura 3.16 la señal de espectro. En cada figura nombrar aparece dos imágenes las cuales hace referencia a dos velocidades 1,25Gbps y otra a 2,5Gbps de izquierda a derecha respectivamente.

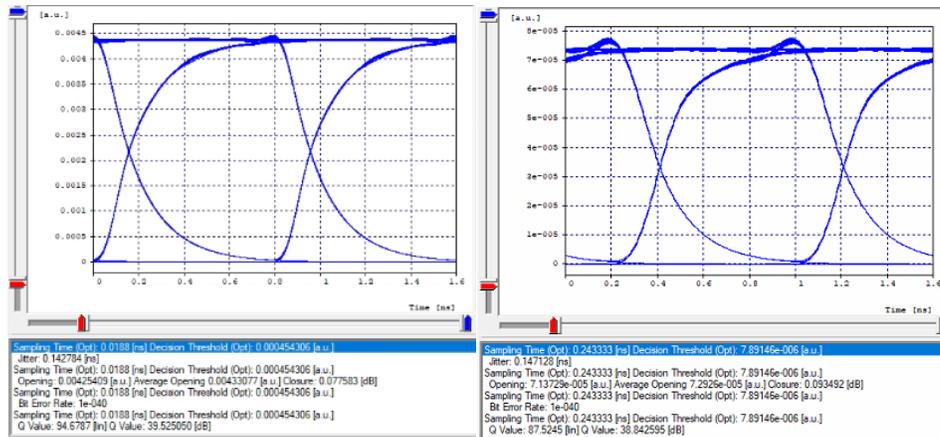


Figura 3.13. Diagrama de ojo de la señal de voz y datos para una ONT en rx.

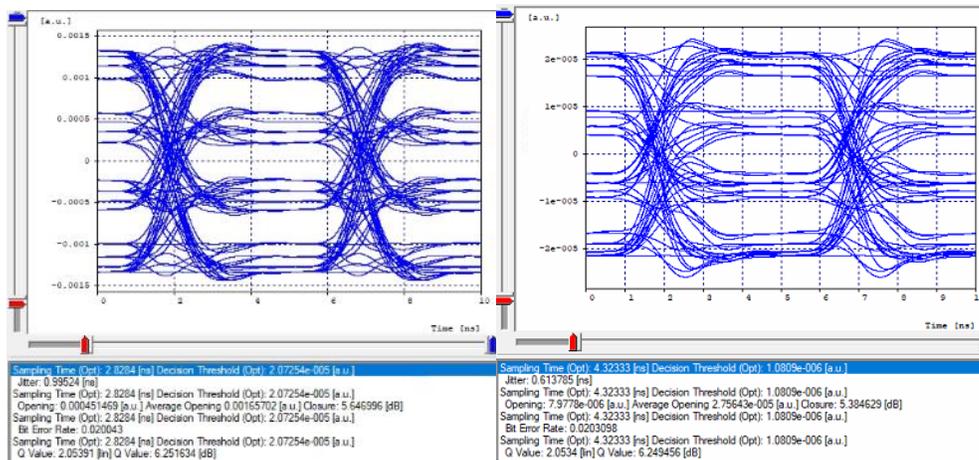


Figura 3.14. Diagrama de ojo de la señal de video para una ONT en rx.

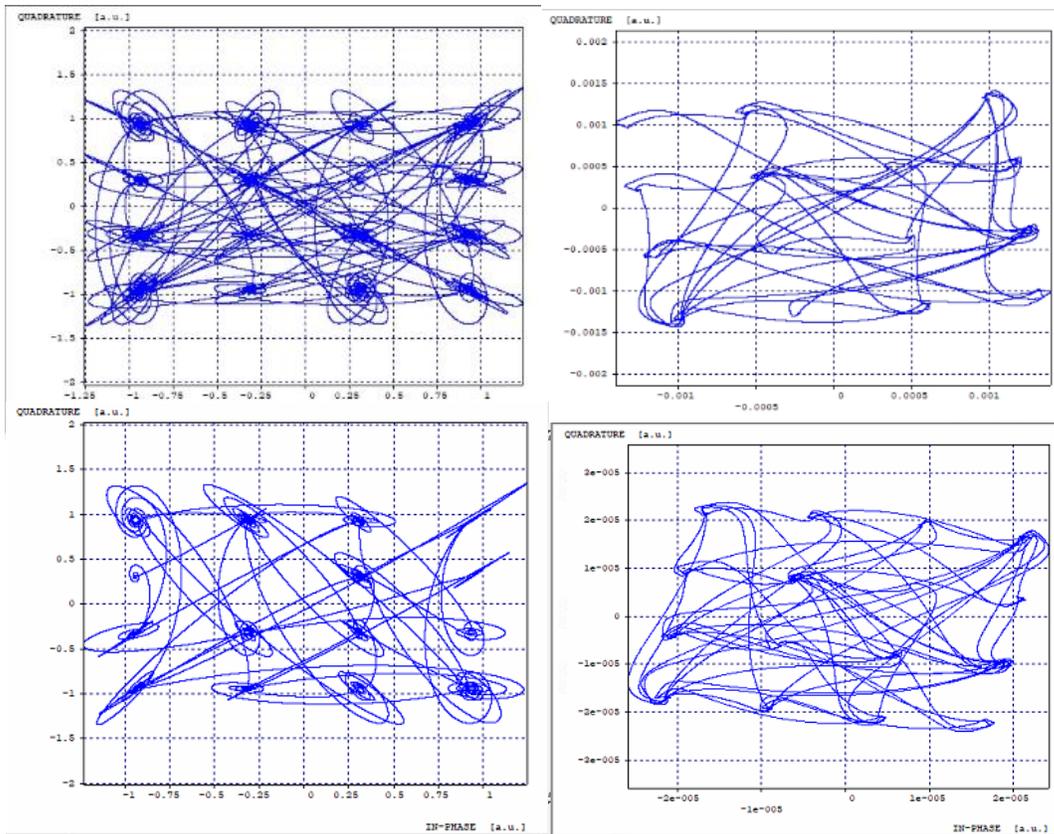


Figura 3.15. Constelación servicio de video para una ONT en tx y en rx.

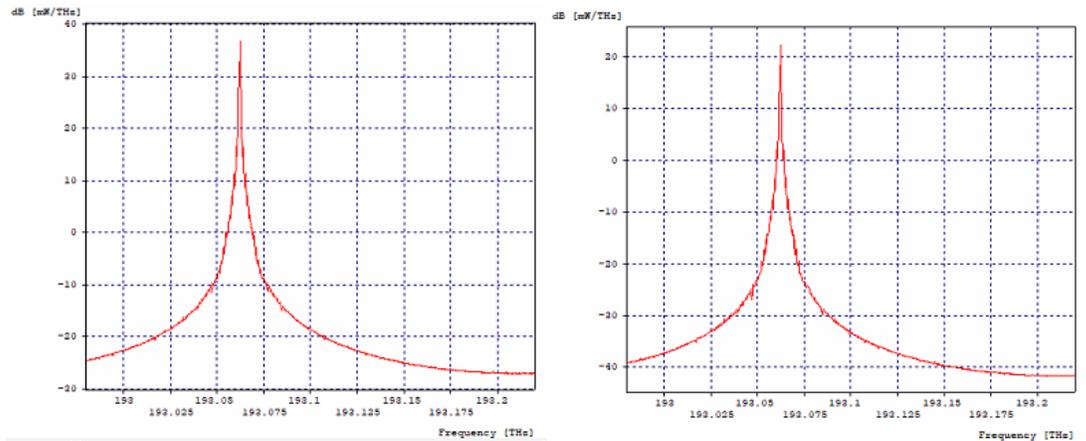


Figura 3.16. Espectro óptico en tx y espectro óptico en rx.

En la figura 3.13 diagrama de ojo, se observa que representa una buena apertura tanto vertical como horizontal, es decir, eje Y amplitud de la señal y eje X tiempo de la señal, lo cual indica que los datos que representan la información están dentro del margen de las recomendaciones para una BER sugerida de 1×10^{-12} ,

o de 1×10^{-7} según la comisión de regulación. Por consiguiente, se ve que el diagrama de la señal de voz y datos cuenta con una buena apertura, lo que significa que los datos se están enviando y recuperando de manera eficiente en recepción, como se observa prácticamente no hay presencia de Jitter para su valor de 0.142.784ns y se tiene una muy buena BER de 1×10^{-40} , esto significa que no hay pérdida de información, y un valor de factor Q igual 39.525.050dB, de esta manera se muestra un buen desempeño que presenta el sistema de acuerdo con [12]. Igualmente, para el servicio de video, como se muestra en la figura 3.14 diagrama de ojo no se mira tan definido como el de la señal de voz y datos, sin embargo, estas serán las características de la señal con la que se tomaran las muestras las cuales arrojaron los siguientes valores, un retardo de 0.99524ns, una BER 0.020.043 y un factor Q de 6.251.634dB, también se puede ver en la figura 3.15 el diagrama de constelación de la señal de video, donde se realiza una comparación entre la señal enviada en transmisión y la recibida por la ONT, se puede ver claramente que cada uno de los puntos dentro de la constelación conservan la misma forma que el diagrama del transmisor, es decir, la señal se puede recuperar con la calidad aceptable para el sistema. De esta manera, como se mencionó, estos son los datos de referencia para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Como se pudo apreciar en la graficas anteriores los resultados arrojados son las condiciones de referencia iniciales empleadas en el sistema planteado en el presente trabajo. A continuación, se presenta las medidas que dieron como resultado en un escenario que tiene ausencia de elementos que interfieran en el trascurso de la señal. De esta manera podemos observar en la tabla 3.4 los valores arrojados por el enlace Back to Back para dos velocidades a trabajar.

Resultados para Monitoreo Óptico iniciales.				
Servicio	Velocidad	BER	Factor Q	Jitter
Voz y datos	1,25Gbps	10e-40	39.525.050dB	0.142.784ns
	2,5Gbps	10e-40	38.842.595dB	0.147.128ns
Video	1,25Gbps	0.020.043	6.251.634dB	0.995.24ns
	2,5Gbps	0.020.309	6.249.456dB	0.613.785ns

Tabla 3.4. Resultados parámetros iniciales.

De acuerdo con los escenarios propuestos para el análisis del sistema y de los algoritmos implementados en la red, a continuación, se muestran los modelos físicos diseñados e implementados en la herramienta OptSim para diferentes ONT. Cabe aclarar que anteriormente se definió una sesión al tema de la inclusión del algoritmo y de la simulación entre OptSim y Matlab, de esta manera como se muestra los arreglos de la figura 3.17 diseñado para una ONT, 3.18 diseñado para 4 ONTs y el escenario 3.19 diseñado para un total de 8 ONTs. Ahora bien, en la parte de los transmisores OLT y receptores ONT están

agrupados en modo componente (caja negra), es decir internamente contiene el mismo escenario general de la figura 3,11 expuesta en el capítulo 3, sección 3.4, también es importante mencionar que los escenarios diseñados, corresponden al mismo funcionamiento correspondiente a la asignación de espectro por medio de una rejilla flexible, con capacidad para un ancho de banda de 100GHz y 200GHz que corresponden a una capacidad de 8 y 16 slot respectivamente, esta es la característica principal dentro de red de prueba FTTH-EON.

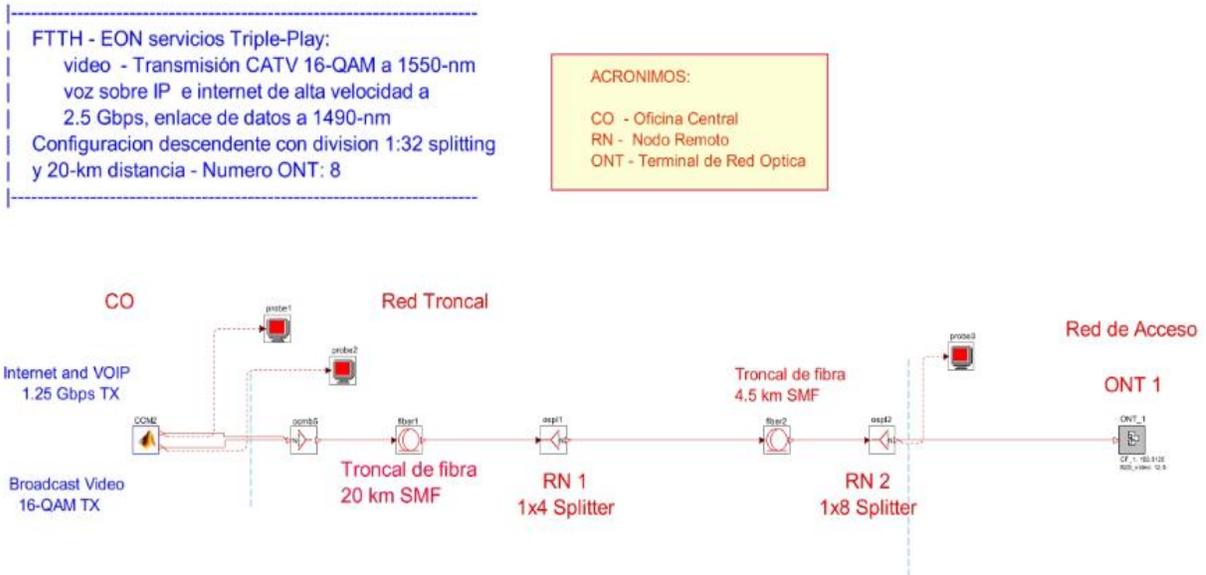


Figura 3.17. Red para 4 ONT con una distancia de 20km y una velocidad de 1.25 Gbps con rejilla de 8 slots.

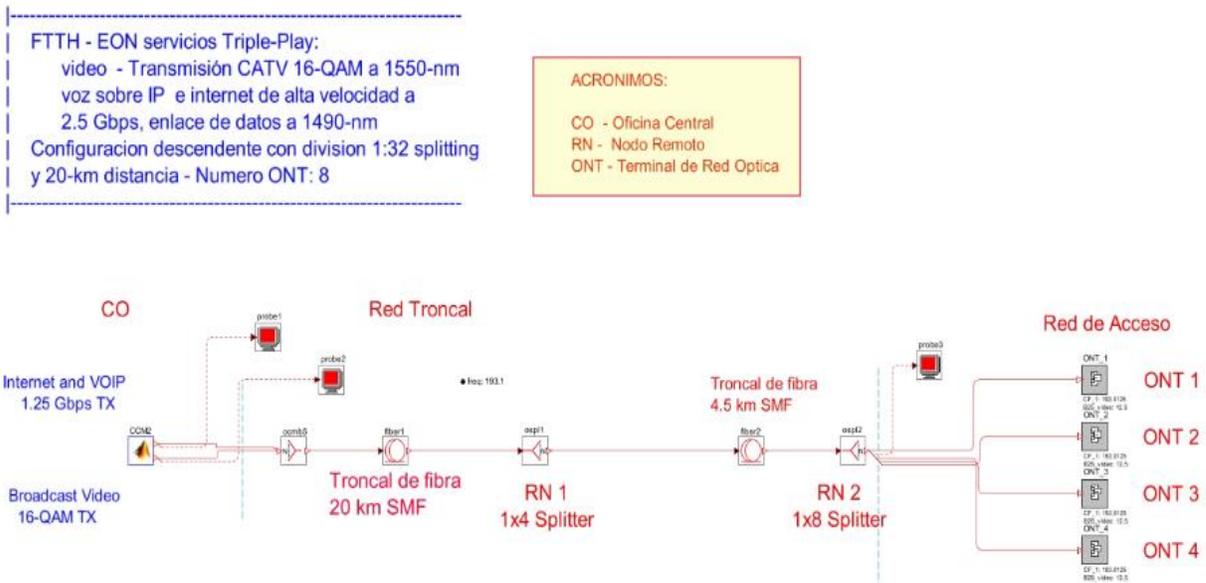


Figura 3.18. Red para 4 ONT con una distancia de 20km y una velocidad de 1.25 Gbps con rejilla de 8 slots.

FTTH - EON servicios Triple-Play:
 video - Transmisión CATV 16-QAM a 1550-nm
 voz sobre IP e internet de alta velocidad a
 2.5 Gbps, enlace de datos a 1490-nm
 Configuración descendente con división 1:32 splitting
 y 20-km distancia - Numero ONT: 8

ACRONIMOS:
 CO - Oficina Central
 RN - Nodo Remoto
 ONT - Terminal de Red Optica

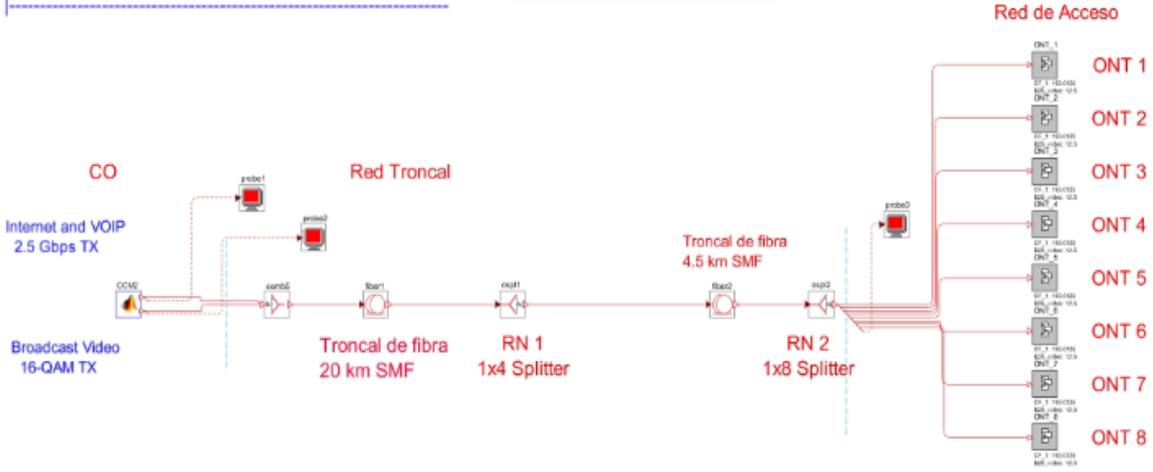


Figura 3.19. Red para 8 ONT con una distancia de 20km y una velocidad de 2.5 Gbps con rejilla de 16 slots.

CAPÍTULO IV. Análisis de resultados, conclusiones y trabajos futuros.

Después de haber estudiado todos los aspectos relacionados con el marco teórico y haber definido los escenarios de simulación, en este capítulo se estudian los resultados obtenidos en la ejecución de las simulaciones y se hace un análisis a cada escenario de prueba; en general, se realiza una recopilación de pruebas y de análisis en relación a las gráficas de la información de acuerdo con los parámetros del desempeño OPM, también se hablará de las conclusiones sobre los resultados obtenidos y finalmente se plantean algunos posibles trabajos futuros.

4.1. Sistema FTTH-EON triple play.

A continuación, se hace el análisis de los resultados obtenidos en relación a los parámetros de evaluación del sistema. El contexto de la simulación consistió en el diseño de tres arreglos, para 1, 4 y 8 ONT, y se varió la velocidad de transmisión del sistema, tomando únicamente dos valores: 1.25Gbps y 2.5Gbps, distancia en kilómetros y la selección de los algoritmos planteados, para la prestación de servicios Triple Play; los demás parámetros configurables se mantuvieron fijos tal como se mencionaron en sesiones anteriores del presente trabajo. Las métricas de evaluación para una red FTTH-EON Triple Play, considerando que se codifica mediante un esquema binario (NRZ), que puede arrojar los siguientes parámetros:

- Diagrama del ojo.
- Tasa de error de bit.
- Factor Q.
- Jitter.

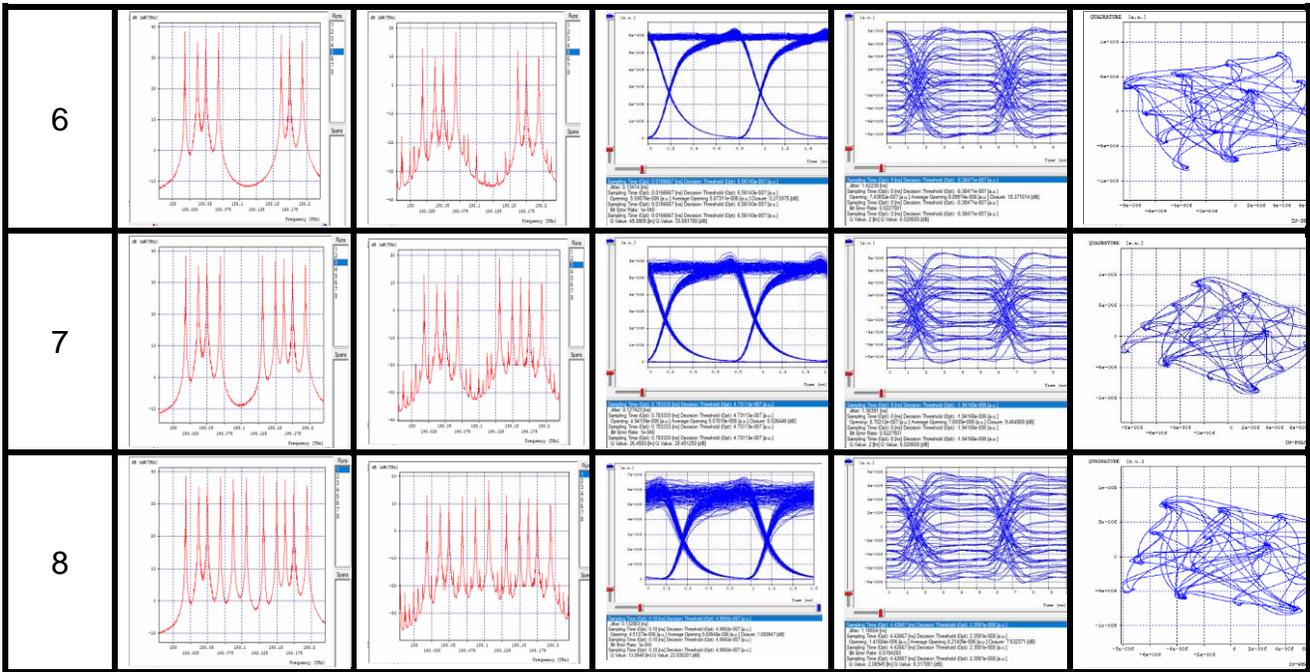
4.1.1. Resultados obtenidos en relación a OPM con el algoritmo péndulo dinámico.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la evaluación del sistema.

Resultados simulaciones para 16 slots

- Resultados para 8-ont con velocidad de 1,25Gbps y distancia 20km.

ONT	Espectro señal de Tx	Espectro señal de Rx	VoIP	Video	Constelación
1			Servicio no solicitado		
2			Servicio no solicitado		
3				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
4				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
5				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación



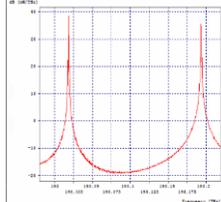
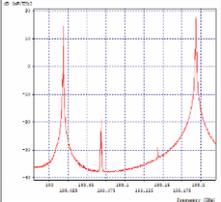
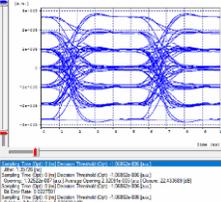
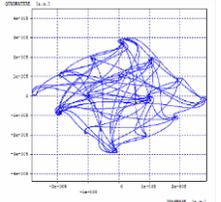
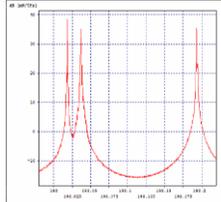
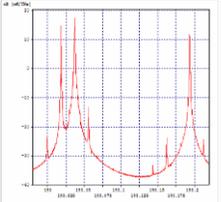
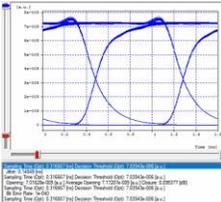
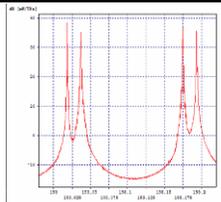
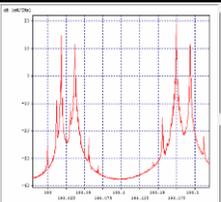
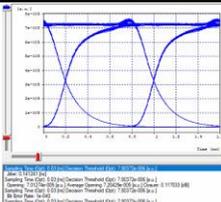
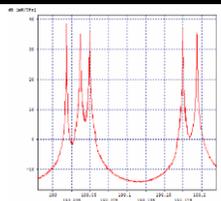
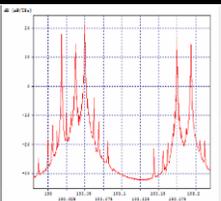
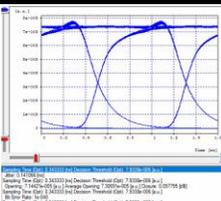
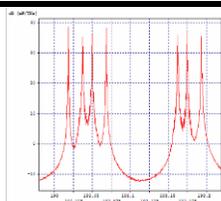
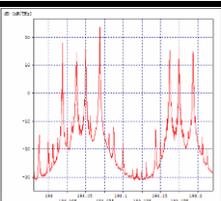
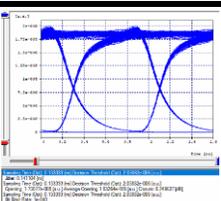
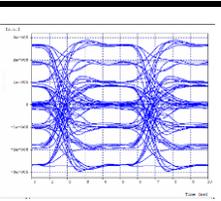
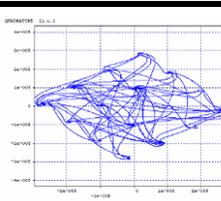
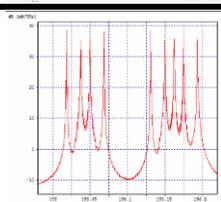
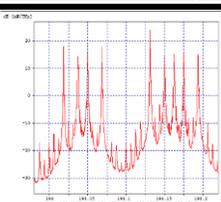
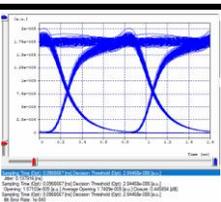
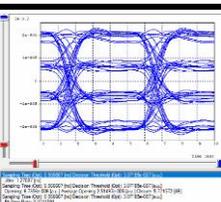
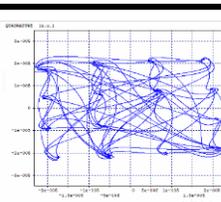
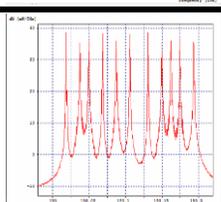
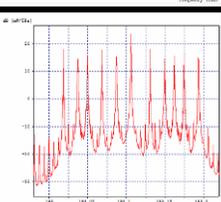
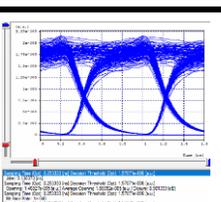
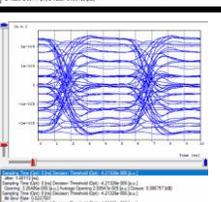
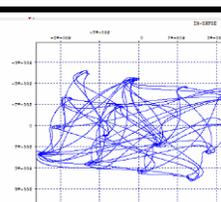
- Resultados para 8-ont con velocidad de 2.5Gbps y distancia de 20km.

ONT	Espectro señal de Tx	Espectro señal de Rx	VoIP	Video	Constelación
			Servicio no solicitado		
2			Servicio no solicitado		
3				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación

4				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
5				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
6					
7					
8					

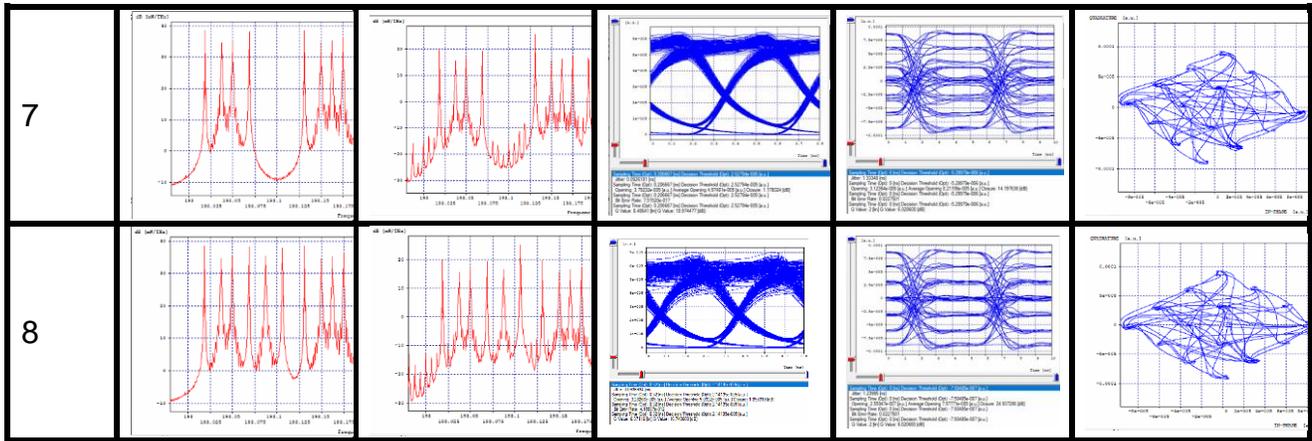
- Resultados para 8-ont con velocidad de 1.25Gbps y distancia de 10km.

ONT	Espectro señal de Tx	Espectro señal de Rx	VoIP	Video	Constelación
1			Servicio no solicitado		

2			<p>Servicio no solicitado</p>		
3				<p>Servicio no solicitado</p>	<p>Si no hay video, entonces no constelación</p>
4				<p>Servicio no solicitado</p>	<p>Si no hay video, entonces no constelación</p>
5				<p>Servicio no solicitado</p>	<p>Si no hay video, entonces no constelación</p>
6					
7					
8					

▪ **Resultados para 8-ont con velocidad de 2.5Gbps y distancia de 10km.**

ONT	Espectro señal de Tx	Espectro señal de Rx	VoIP	Video	Constelación
1			Servicio no solicitado		
2			Servicio no solicitado		
3				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
4				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
5				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
6					



Resultados para 8 slots.

- **Resultados para 4-ont con velocidad 1,25Gbps y distancia 20km.**

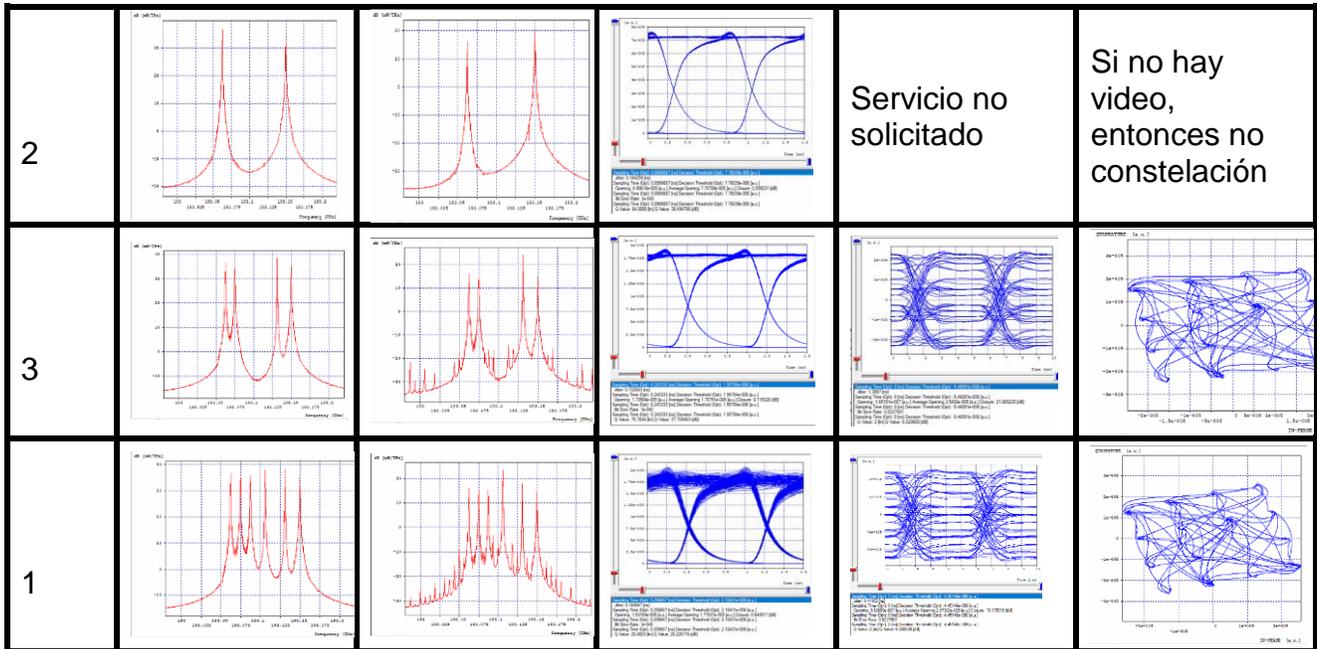
ONT	Espectro señal de Tx	Espectro señal de Rx	VoIP	Video	Constelación
4				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
2				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
3					
1					

- Resultados para 4-ont con velocidad de 2.5Gbps y distancia de 20km.

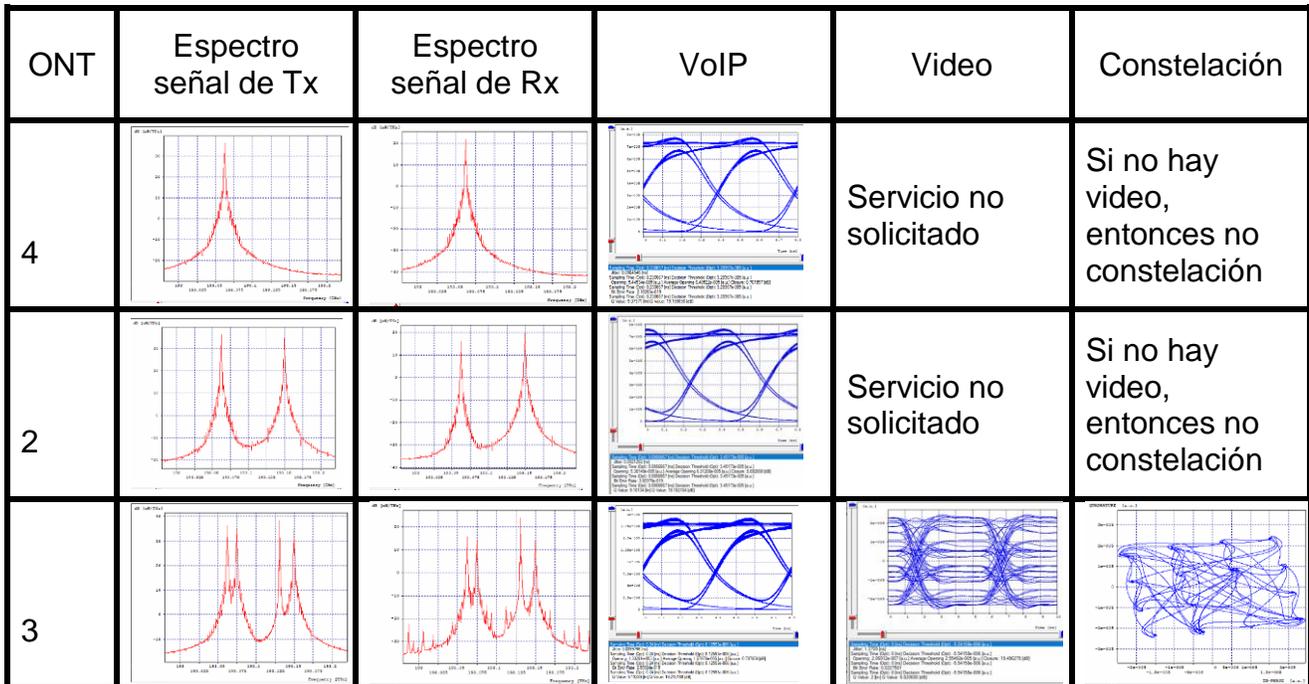
ONT	Espectro señal de Tx	Espectro señal de Rx	VoIP	Video	Constelación
4				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
2				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
3					
1					

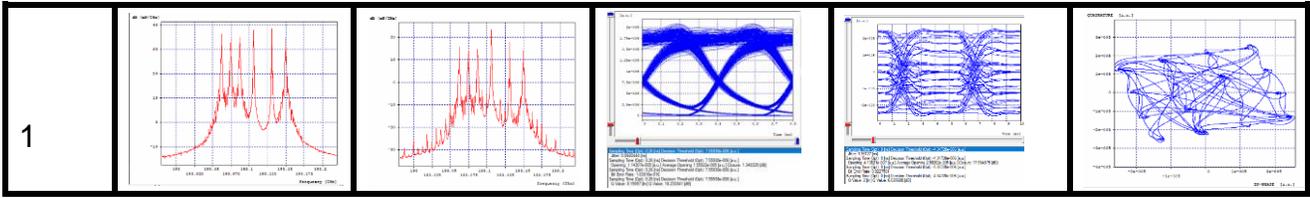
- Resultados para 4-ont con velocidad de 1.25Gbps y distancia de 10km.

ONT	Espectro señal de Tx	Espectro señal de Rx	VoIP	Video	Constelación
4				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación



- Resultados para 4-ont con velocidad de 1.25Gbps y distancia de 20km.



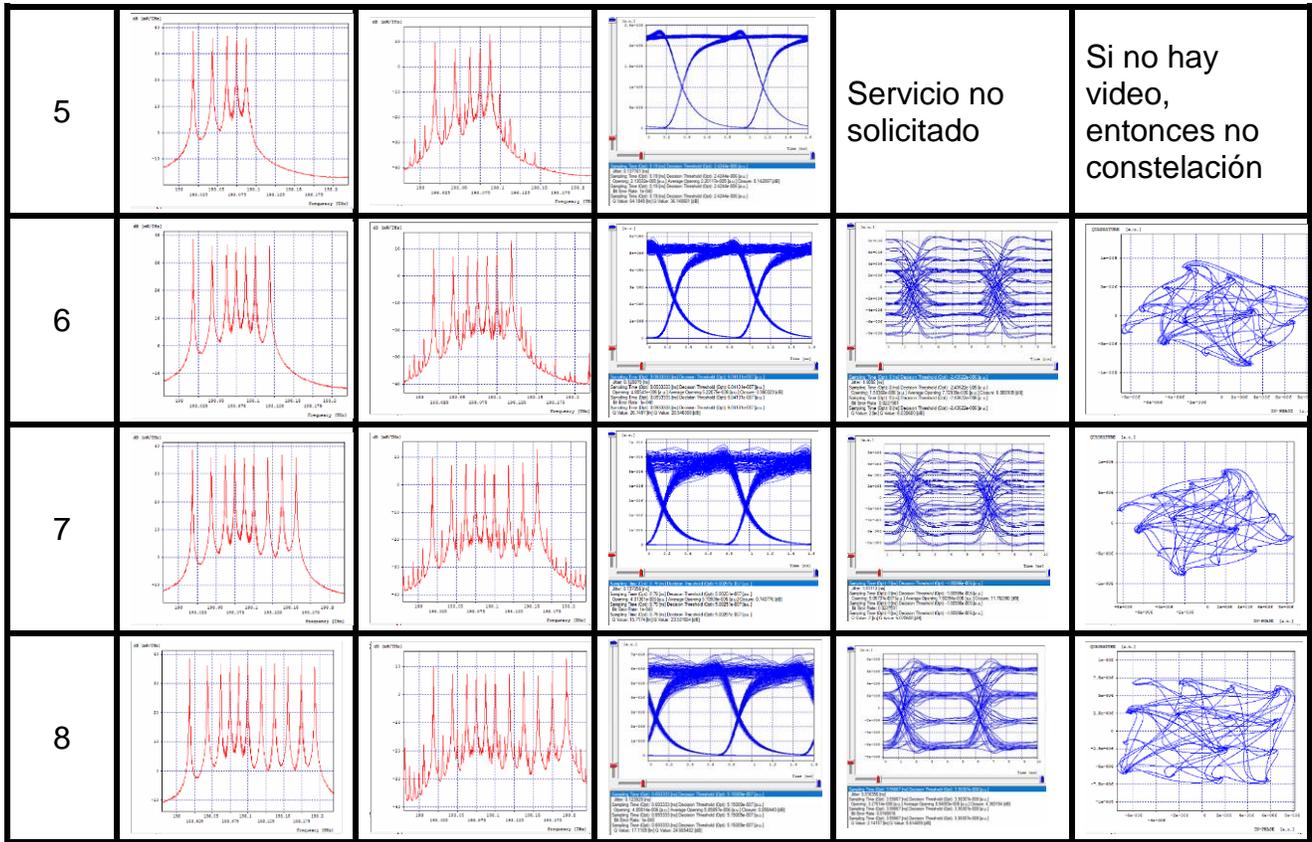


4.1.1. Resultados obtenidos en relación a OPM con el algoritmo Exact FIT.

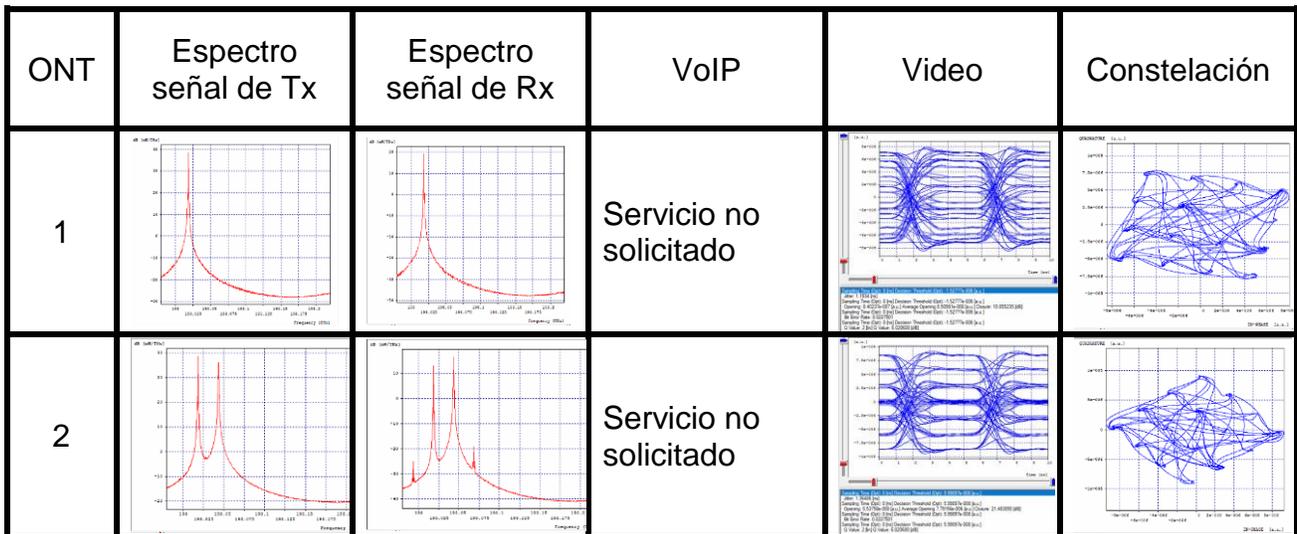
Resultados simulaciones para 16 slots

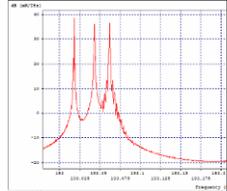
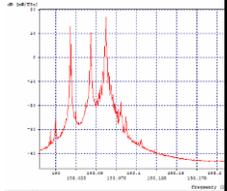
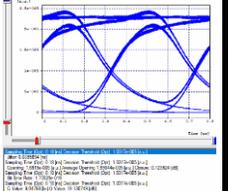
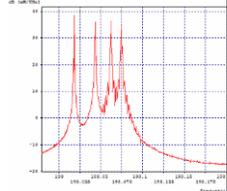
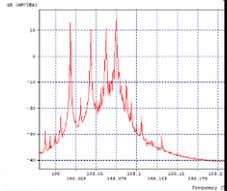
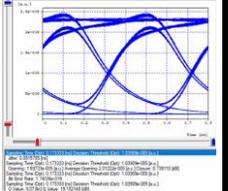
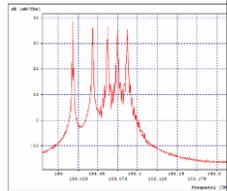
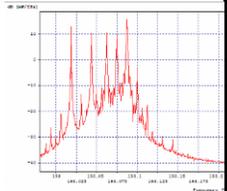
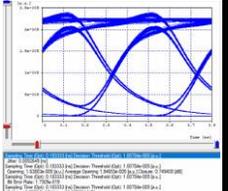
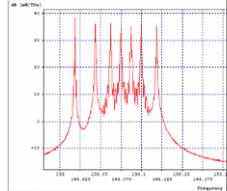
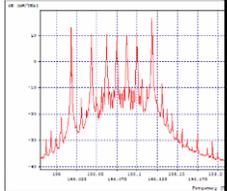
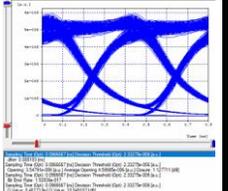
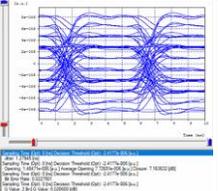
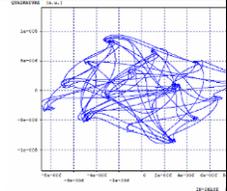
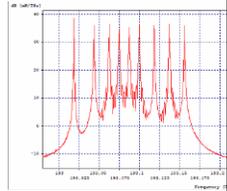
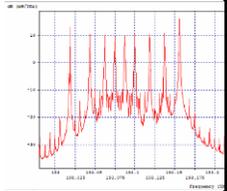
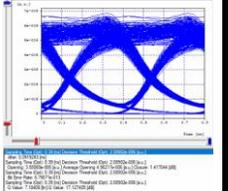
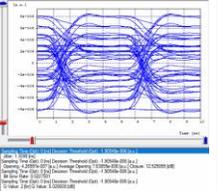
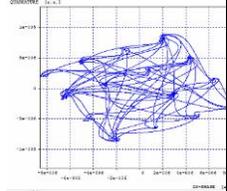
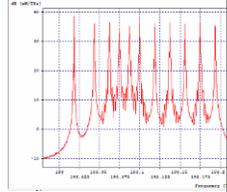
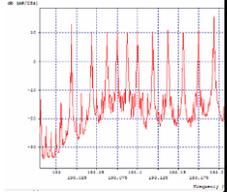
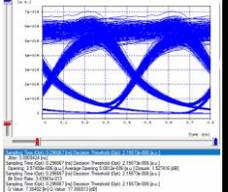
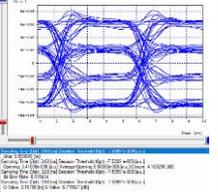
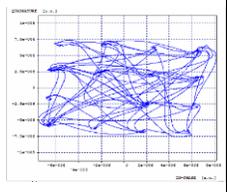
- Resultados para 8-ont con velocidad 1,25 distancia 20km.

ONT	Espectro señal de Tx	Espectro señal de Rx	VoIP	Video	Constelación
1			Servicio no solicitado		
2			Servicio no solicitado		
3				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
4				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación



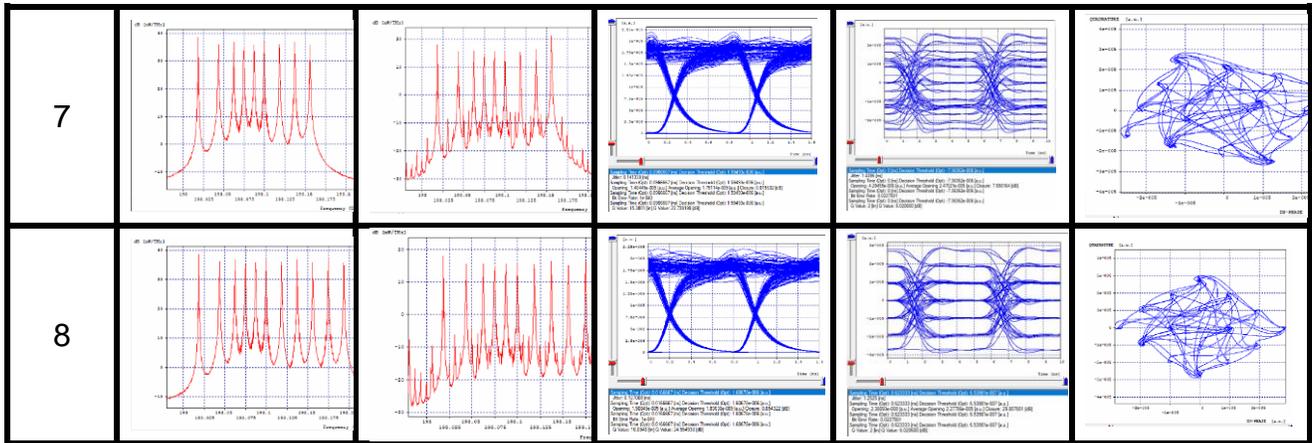
▪ Resultados para 8-ont con velocidad 2,5Gbps y distancia 20km.



3				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
4				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
5				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
6					
7					
8					

▪ Resultados para 8-ont con velocidad 1,25Gbps y distancia 10km.

ONT	Espectro señal de Tx	Espectro señal de Rx	VoIP	Video	Constelación
1			Servicio no solicitado		
2			Servicio no solicitado		
3				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
4				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
5				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
6					



▪ Resultados para 8-ont con velocidad 2,5Gbps y distancia 10km.

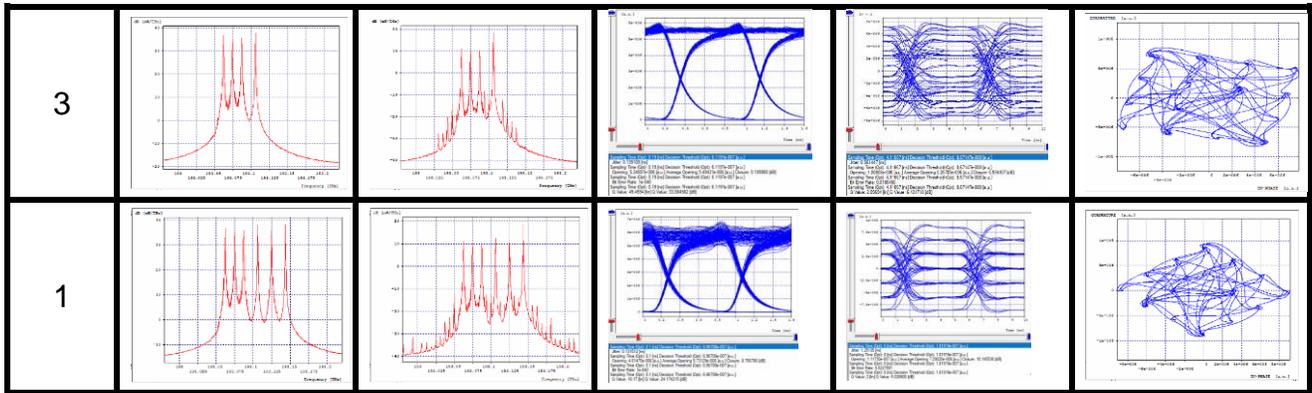
ONT	Espectro señal de Tx	Espectro señal de Rx	VoIP	Video	Constelación
1			Servicio no solicitado		
2			Servicio no solicitado		
3				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
4				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación

5						Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
6							
7							
8							

RESULTADOS PARA 8 SLOTS

- Resultados para 4-ont con velocidad 1,25Gbps y distancia 20km.

ONT	Espectro señal de Tx	Espectro señal de Rx	VoIP	Video	Constelación
4				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
2				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación



▪ **Resultados para 4-ont con velocidad 2,5Gbps y distancia 20km.**

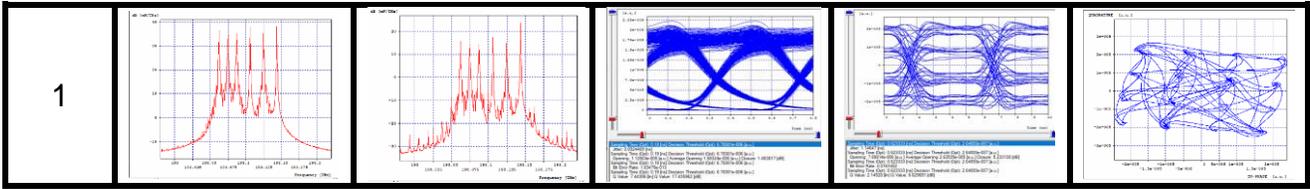
ONT	Espectro señal de Tx	Espectro señal de Rx	VoIP	Video	Constelación
4				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
2				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
3					
1					

▪ **Resultados para 4-ont con velocidad 1,25Gbps y distancia 10km.**

ONT	Espectro señal de Tx	Espectro señal de Rx	VoIP	Video	Constelación
4				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
2				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
3					
1					

▪ **Resultados para 4-ont con velocidad 2,5Gbps y distancia 10km.**

ONT	Espectro señal de Tx	Espectro señal de Rx	VoIP	Video	Constelación
4				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
2				Servicio no solicitado	Si no hay video, entonces no constelación
3					



4.2 Tablas de resultados.

De acuerdo a los escenarios presentados en el capítulo anterior a continuación se presentan los resultados obtenidos en el sistema.

La asignación de los servicios triplay se muestra en la tabla 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 para 4 ONTs y en las tablas 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8 para 8 ONTs respectivamente, las cuales muestran el registro de los servicios solicitados por cada ONT, es decir, se llena a medida que los requerimientos llegan a la oficina central y estos son asignados de acuerdo al funcionamiento de los algoritmos que están evaluando las solicitudes desde la llegada del primer servicio hasta su fin en estricto orden de llegada según los requerimientos de cada ONT; de esta manera las tablas muestran el orden de asignación de los servicios, los cuales comprenden un total de 4 ONTs con el siguiente orden de solicitud de los servicios: ONT 4 y 2 servicio de VoIP/Internet y ONT 3 y 1 servicio triple play, mientras que para 8 ONTs cuya orden de asignación y solicitud ha sido la siguiente: ONT 7 y 6 servicio de video; ONT 8, 4 y 2 servicio de VoIP/Internet y ONT 5, 3, y 1 servicio triple play. Dicho lo anterior los espacios en blanco en las tablas, indica la no solicitud del servicio por parte de las ONTs, expuesto en la sesión anterior.

Los espacios en blanco se deben al no requerimiento de los servicios por parte de los usuarios finales.

Resultados correspondientes a la simulación con 8 slots y 4 ONTs, variando la distancia entre 10km y 20 km, con velocidad de transmisión de 1,25Gbps y 2,5Gbps, incluyendo el algoritmo de exact-fit adaptado y péndulo dinámico.

Escenario: Caso A, Velocidad 1.25 y 20km												
Sub caso No1	PENDULO DINAMICO						EXACT-FIT					
	VoIP			VIDEO			VoIP			VIDEO		
ONT	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]
4	37.909.802	1e-040	0.134924	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	37.909.802	1e-040	0.134924	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado
2	37.676.671	1e-040	0.136198	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	37.544.749	1e-040	0.136454	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado
3	34.936.196	1e-040	0.120815	6.020.600	0.0227501	1.36692	33.884.982	1e-040	0.139109	6.431.718dB	0.0180468	0.96144
1	26.086.804	1e-040	0.132141	6.345.510	0.018961	1.14054	24.174.215	1e-040	0.131512	6.020.600dB	0.0227501	1.25135

Tabla 4.1. Resultados: 1,25 Gbps, 20 km, 8 slots - 4 ONTs.

Escenario: Caso B, Velocidad 2.5 y 20km												
Sub caso No1	PENDULO DINAMICO						EXACT-FIT					
	VoIP			VIDEO			VoIP			VIDEO		
ONT	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]
4	19.136.913	2.49831e-019	0.0888339	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	19.136.913	2.49831e-019	0.0888339	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado
2	19.141.522	3.44374e-019	0.0893347	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	19.139.539	1.82138e-019	0.0913633	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado
3	19.105.066	1.56304e-019	0.0889407	6.020.600	0.0227501	1.3654	19.061.707	1.78228e-019	0.0893337	6.402.354	0.0186783	1.19832
1	18.246.212	1.63703e-016	0.0894256	6.409.012	0.0184494	1.23731	17.514.178	1.30848e-013	0.0898629	6.020.600	0.0227501	1.10637

Tabla 4.2. Resultados: 2,5 Gbps, 20 km, 8 slots - 4 ONTs.

Escenario: Caso A, Velocidad 1.25 y 10km												
Sub caso No1	PENDULO DINAMICO						EXACT-FIT					
	VoIP			VIDEO			VoIP			VIDEO		
ONT	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]
4	38.842.595	1e-040	0.147128	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	38.842.595	1e-040	0.147128	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado
2	38.494.766	1e-040	0.144259	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	38.723.265	1e-040	0.143994	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado
3	37.705.463	1e-040	0.132843	6.020.600	0.0227501	1.3897	34.891.675	1e-040	0.136676	6.020.600	0.0227501	1.38718
1	26.226.715	1e-040	0.140974	6.020.600	0.0227501	1.44168	24.031.328	1e-040	0.140201	6.668.192	0.01156221	1.22895

Tabla 4.3. Resultados: 1,25 Gbps, 10 km, 8 slots - 4 ONTs.

Escenario: Caso B, Velocidad 2.5 y 10km												
Sub caso No1	PENDULO DINAMICO						EXACT-FIT					
	VoIP			VIDEO			VoIP			VIDEO		
ONT	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]
4	19.155.696	2.18263e-019	0.0904546	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	22.055.868	2.18263e-019	0.0904546	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado
2	19.182.104	3.80379e-019	0.0921202	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	17.229.329	1.46852e-019	0.0920214	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado
3	19.212.168	2.99924e-019	0.0899796	6.020.600	0.0227501	1.3709	12.402.790	1.38501e-019	0.0885425	6.020.600	0.0227501	1.3752
1	18.233.340	1.83818e-016	0.0920444	6.020.600	0.0227501	1.36127	17.576.251	1.83475e-013	0.0924469	6.668.192	0.0161402	1.14647

Tabla 4.4. Resultados: 2,5 Gbps, 10 km, 8 slots - 4 ONTs.

Resultados correspondientes a la simulación con 16 slots y 8 ONTs, variando la distancia entre 10km y 20 km, con velocidad de transmisión de 1,25Gbps y 2,5Gbps, incluyendo el algoritmo de exact-fit y péndulo dinámico.

Escenario: Caso A, Velocidad 1.25 y 20km												
Sub caso No2	PENDULO DINAMICO						EXACT-FIT					
	VoIP			VIDEO			VoIP			VIDEO		
ONT	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]
7	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	6.020.600	0.0227501	1,25747	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	6.020.600	0.0227501	1.1934
6	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	6.302.673	0.0194766	1,13463	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	6.020.600	0.0227501	1.36486
8	37.067.598	1e-40	0.134705	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	37.32.6423	1e-040	0.128576	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado
4	37.084.284	1e-40	0.131681	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	37.745.980	1e-040	0.141463	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado
2	37.864.520	1e-40	0.135896	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	36.148.601	1e-040	0.137161	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado
5	33.081.700	1e-40	0.13414	6.020.600	0.0227501	1,42239	28.546.388	1e-040	0.126875	6.020.600	0.0227501	1.4098
3	28.451.250	1e-40	0.127423	6.020.600	0.0227501	1,38391	23.927.604	1e-040	0.137056	6.020.600	0.0227501	1.41113
1	22.838.281	1e-40	0.132803	6.317.081	0.0194293	1,16604	24.665.482	1e-040	0.123929	6.614.659	0.0165516	0.816356

Tabla 4.5. Resultados: 1,25 Gbps, 20 km, 16 slots - 8 ONTs.

Escenario: Caso B, Velocidad 2,5 y 20km												
Sub caso No2	PENDULO DINAMICO						EXACT-FIT					
	VoIP			VIDEO			VoIP			VIDEO		
ONT	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]
7	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	6.249.456	0.0203098	0,61379	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	6.020.600	0.0227501	1.1934
6	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	6.020.600	0.0227501	1,35726	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	6.020.600	0.0227501	1.36486
8	38.426.715	1e-40	0.14849	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	19.130.749	1.73523e-019	0.0895894	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado
4	38.185.165	1e-40	0.141241	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	19.152.148	1.74036e-019	0.0915785	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado
2	38.219.444	1e-40	0.141066	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	19.176.624	1.7305e-019	0.0892649	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado
5	32.172.762	1e-40	0.141104	6.156.189	0.0211091	1,27087	18.549.187	1.52836e-019	0.088103	6.020.600	0.0227501	1.27945
3	29.344.484	1e-40	0.137916	6.156.189	0.0211091	1,27087	17.127405	6.79071e-013	0.0919263	6.020.600	0.0227501	1.3599
1	23.002.598	1e-40	0.138073	6.020.600	0.0227501	1,48113	17.366.913	3.43961e-013	0.0909424	6.719.521	0.015434	0.990049

Tabla 4.6. Resultados: 2,5 Gbps, 20 km, 16 slots - 8 ONTs.

Escenario: Caso A, Velocidad 1.25 y 10km												
Sub caso No2	PENDULO DINAMICO						EXACT-FIT					
	VoIP			VIDEO			VoIP			VIDEO		
ONT	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]
7	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	6.020.600	0.0227501	1,25747	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	6.812.303	0.0142448	1.1127
6	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	6.302.673	0.0194766	1,13463	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	6.020.600	0.0227501	1.33414
8	19.181.872	8.6883e-020	0.0905338	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	38.329.906	1e-040	0.139805	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado
4	19.158.736	1.84255e-019	0.0903958	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	38.496.205	1e-040	0.147714	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado
2	19.180.358	3.73159e-019	0.905442	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	36.397.692	1e-040	0.149671	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado
5	19.043.265	8.58206e-019	0.0897436	6.020.600	0.0227501	1,42698	28.597.212	1e-040	0.134185	6.020.600	0.0227501	1.35118
3	18.546.198	8.6387e-017	0.0901061	6.020.600	0.0227501	1,31377	23.739.199	1e-040	0.141339	6.020.600	0.0227501	1.4396
1	16.837.528	2.12931e-012	0.0921061	6.282.677	0.0200405	1,22986	24.554938	1e-040	0.127008	6.020.600	0.0227501	1.2525

Tabla 4.7. Resultados: 1,25 Gbps, 10 km, 16 slots - 8 ONTs.

Escenario: Caso B, Velocidad 2.5 y 10km												
Sub caso No2	PENDULO DINAMICO						EXACT-FIT					
	VoIP			VIDEO			VoIP			VIDEO		
ONT	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]
7	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	6.868.887	0.0139033	0,53362	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	6.812.303	0.0142448	1.1127
6	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	6.295.284	0.0195197	1,08976	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	6.020.600	0.0227501	1.33414
8	19.190.031	3.47102e-019	0.0911992	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	19.118.220	1.48058e-019	0.0918418	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado
4	19.156.638	5.08309e-019	0.0905603	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	19.216.334	2.67308e-019	0.0918803	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado
2	19.169.272	4.2819e-019	0.0922214	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	19.172.216	2.21846e-019	0.0892706	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado	Servicio no solicitado
5	19.053.847	4.21594e-019	0.0907651	6.020.600	0.0227501	1,26266	18.608.869	1.12614e-017	0.0902416	6.020.600	0.0227501	1.36788
3	18.574.477	7.51528e-017	0.0926181	6.050.600	0.0227501	1,33348	17.137.634	3.95443e-013	0.0941268	6.020.600	0.0227501	1.39045
1	16.740.600	4.15087e-012	0.0936934	6.020.600	0.0227501	1,23995	17.435.139	2.1049e-013	0.943351	6.020.600	0.0227501	1.2022

Tabla 4.8. Resultados: 2,5 Gbps, 10 km, 16 slots - 8 ONTs.

De acuerdo con el registro de los resultados presentes en las tablas anteriores, a continuación, se presentan los gráficos para estudiar el comportamiento del sistema y de los algoritmos implementados para su evaluación.

4.3. Gráficas de resultados.

En las Figuras 4.1, 4.2 se muestra los resultados de la BER, por orden de asignación de espectro para cada ONT.

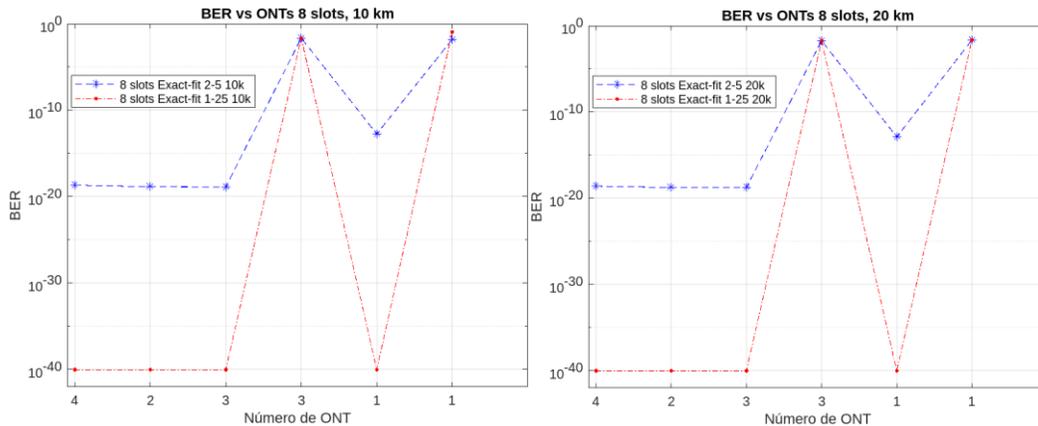


Figura 4.1. BER vs orden de asignación de ONTs en el espectro, exact-fit.

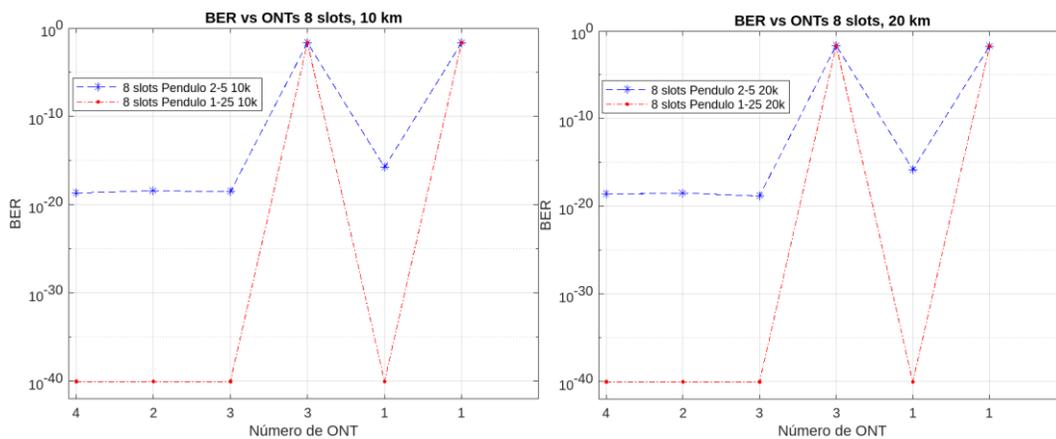


Figura 4.2. BER vs orden de asignación de ONTs en el espectro, péndulo.

En las figuras 4.1 y 4.2 se presenta el comportamiento de la red, en la asignación de los servicios que opera a 8 slots con diferente velocidad y distancia, para los algoritmos Exact-fit, y Péndulo dinámico.

Cada punto de las gráficas representa la asignación de uno de los servicios a una ONT, ya sea VoIP/internet, Video o simplemente Triple Play. El cambio de pendiente que presenta las gráficas se debe a que la asignación de los servicios se realiza de acuerdo a la solicitud por parte de las ONTs. Una de las ventajas adicionales con la que cuenta el algoritmo es que en el caso en que una ONT requiera para su conexión servicio Triple Play (VoIP/Internet y video), el algoritmo se encarga de asignar primero el servicio de Voip/internet en el espacio

de slots disponible (2 slots), y seguidamente asigna el servicio de video cumpliendo así con la solicitud, de esta manera al hacer una división de los servicios, permite flexibilidad en el envío de los servicios con un mínimo de 3 slots, que para este caso, no necesariamente deben estar contiguos ya que el algoritmo si en su búsqueda encuentra un espacio con las características del ancho de banda para VoIP/internet, resuelve enviando este primer requerimiento para posteriormente seguir en su búsqueda y realizar la asignación de video, con esto el algoritmo automatiza el proceso ya que de lo contrario debería buscar hasta encontrar la cantidad solicitada. Esto puede ser posible de acuerdo con las convenciones definidas en el escenario de simulación las cuales son:

- El servicio de audio y datos ocupará un ancho de banda de 12,5 GHz equivalentes a un slot en la rejilla espectral.
- Los paquetes de servicio de video ocuparan un ancho de banda de 25 GHz, equivalentes a dos slots en la rejilla espectral.

Cabe aclarar que esto incluye para todos los escenarios y su análisis en este capítulo.

La figura 4,1 y 4,2 muestran la relación de BER vs ONT de acuerdo con cada solicitud y asignación de los servicios por cada ONT, utilizando los algoritmos exact-fit y péndulo dinámico. Los resultados arrojados indican el comportamiento del sistema y la calidad de los servicios prestados. En ambos casos el comportamiento es muy similar, presentando una buena respuesta en todos los escenarios expuestos, tanto para velocidades de 1.25Gbps y 2,5Gbps como para las distancias de 10km y 20km. Además los resultados muestran que el algoritmo de péndulo presenta mejores valores en la ONT 1, correspondiente al servicio de VoIP/internet con un valor de BER de $10e-17$ para una velocidad de 2,5Gbps a 10km y 20km, mientras que para esta misma ONT con asignación de exact-fit el valor de BER es de $10e-13$ lo cual demuestra que péndulo mediante su asignación presenta mejores resultados en cuanto a la calidad de información recibida en el sistema.

Para el servicio de video el sistema muestra una BER del orden de $10e-3$, en ambos casos ya sea para péndulo como para exact-fit, de esta manera se observa que la red y los servicios se comportan de buena manera, es decir arrojan los resultados acordes a los parámetros establecidos para la señal de video y VoIP/datos que se tomaron como base de referencia inicial para los escenarios en estudio.

De esta manera podemos afirmar que el sistema de asignación dinámica tanto péndulo dinámico y exact-fit cumplen con una buena asignación de los servicios a diferentes velocidades y diferentes distancias de la red, evidenciando así una buena calidad de la información recibida a través de la red FTTH-EON para las ONTs demostrando una buena respuesta del sistema.

En las Figuras 4.3, 4.4 se evidencian los resultados del Factor Q, por orden de asignación de espectro para cada ONT.

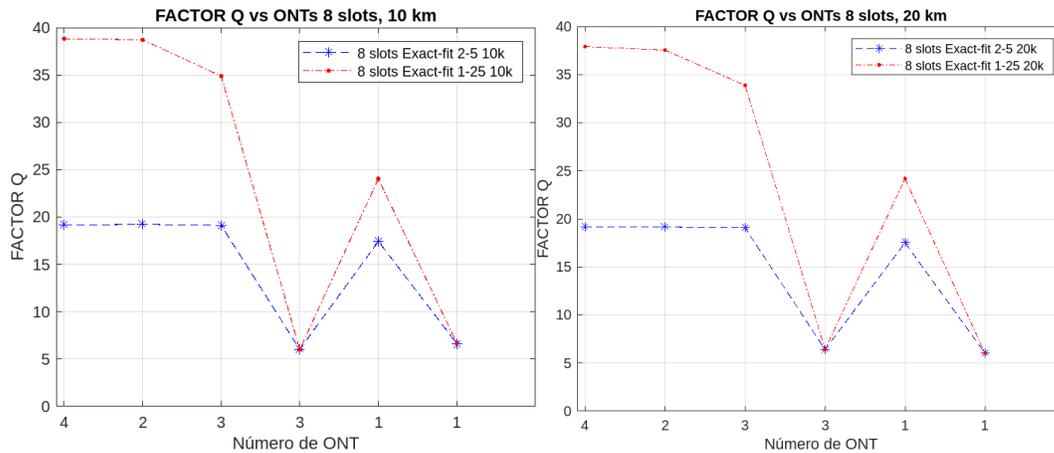


Figura 4.3. Factor Q vs orden de asignación de ONTs en el espectro, exact-fit.

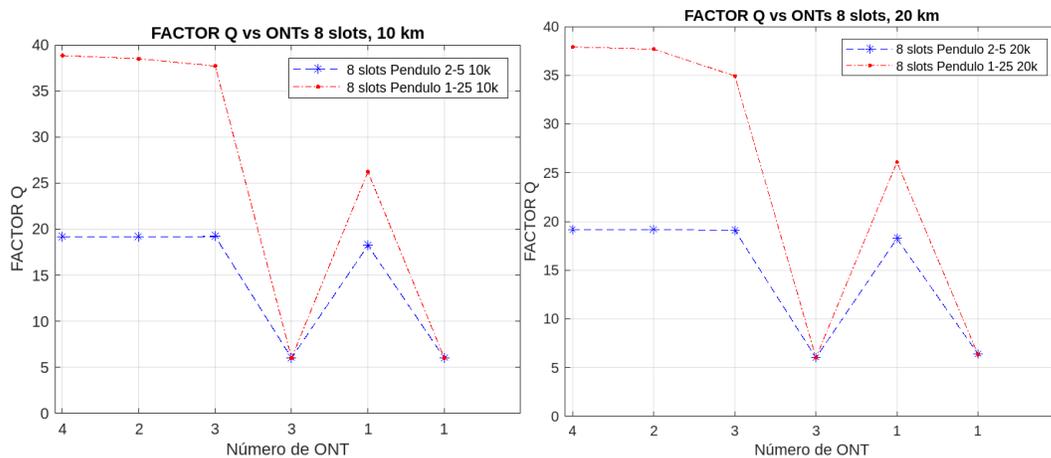


Figura 4.4. Factor Q vs orden de asignación de ONTs en el espectro, péndulo.

De acuerdo a la información presentada en las figuras 4.3 y 4.4 se muestra el comportamiento del sistema mediante el factor Q por orden de asignación de cada ONT en el espectro, se logra apreciar que el sistema se comporta mejor a velocidad de 1,25Gbps, para distancias entre los 10km y 20km de fibra hasta el hogar el cual arroja un factor Q de alrededor de 40dB, mientras que para velocidades de 2,5Gbps y distancias de 10km y 20km arrojan un valor de alrededor de 22dB, correspondientes a servicio de VoIP/internet, y para el servicio de video se evidencia un buen comportamiento con un valor constante de alrededor de 6dB y 7dB, manteniendo sus características de la señal de información de acuerdo a los parámetros establecidos inicialmente.

Según los datos obtenidos muestran que el algoritmo de péndulo dinámico es mucho más eficiente debido a que gráficamente péndulo presenta entre cambios de ONT menos pendiente que exact-fit, conllevando a un mejor desempeño del sistema. Dicho sea de paso, se observa el comportamiento de péndulo es más estable manteniendo sus valores constantes para cada ONT, es decir, el comportamiento tiende a ser una recta, mientras que para exact-fit sus valores empiezan a bajar a medida que se asignan más recursos, es decir, su comportamiento es una recta lineal con pendiente negativa.

Final se concluye que el sistema tiene un buen desempeño de acuerdo a las condiciones iniciales de la red, es decir, el desempeño del sistema es el correcto de acuerdo con las características y parámetros de evaluación en los escenarios planteados, llegando a concluir que péndulo mejora el sistema debido a la forma en que realiza la asignación del espectro óptico en la red.

En las Figuras 4.5, 4.6 se evidencian los resultados de Jitter, por orden de asignación de espectro para cada ONT.

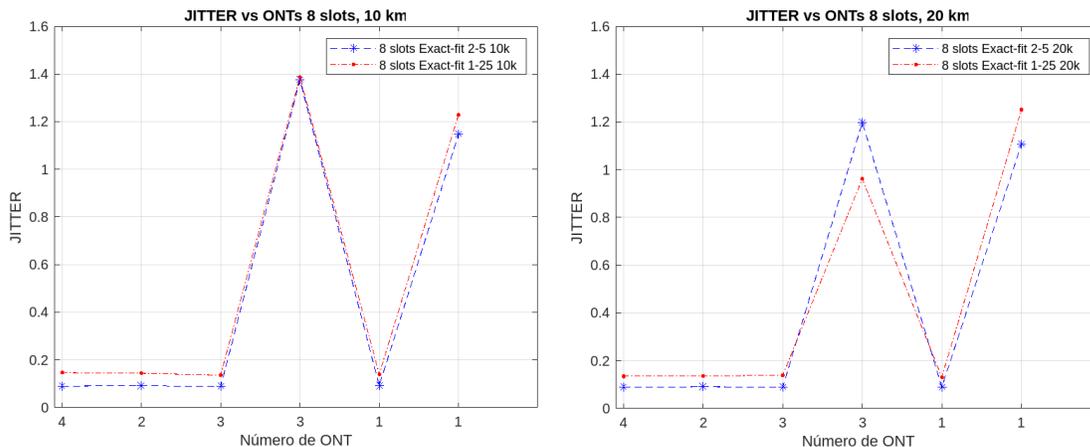


Figura 4.5. Jitter vs orden de asignación de ONTs en el espectro, exact-fit.

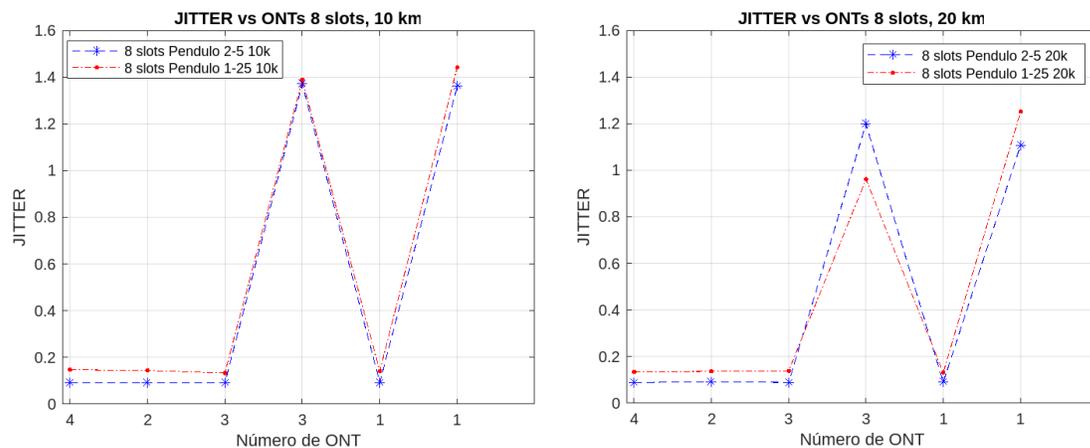


Figura 4.6. Jitter vs orden de asignación de ONTs en el espectro, péndulo.

En las Figuras 4.5, 4.6 se muestra la asignación de espectro para cada ONT en relación al jitter el cual es considerado un retardo de señal no deseado, en general dentro del sistema el efecto de jitter está presente, sin embargo se encuentra dentro de los márgenes esperados, ya que se puede ver que el comportamiento de la señal es estable para todos los casos en la asignación de los recursos de las ONTs, además los valores arrojados en el sistema están dentro del margen de tolerancia, por otro lado se denota que el valor de jitter no incrementa, lo cual quiere decir que no hay corrimientos de la señal que se presenten debido a superposición entre pulsos, que normalmente conllevan a generación de ISI. De acuerdo con los diagramas de ojo los cuales tienen una buena apertura y como se comparó anteriormente la BER, se puede ver que los resultados son similares y el mejor comportamiento lo presenta con el algoritmo de péndulo debido a q los valores indican una medida más constante que con exact-fit.

A continuación, se muestran los resultados correspondientes a la simulación con 16 slots y 8 ONTs, variando la distancia entre 10km y 20 km, con velocidad de transmisión de 1,25Gbps y 2,5Gbps, incluyendo el algoritmo de exact-fit y péndulo dinámico.

En las Figuras 4.7, 4.8 se observan los resultados de la BER, por orden de asignación de espectro para cada ONT.

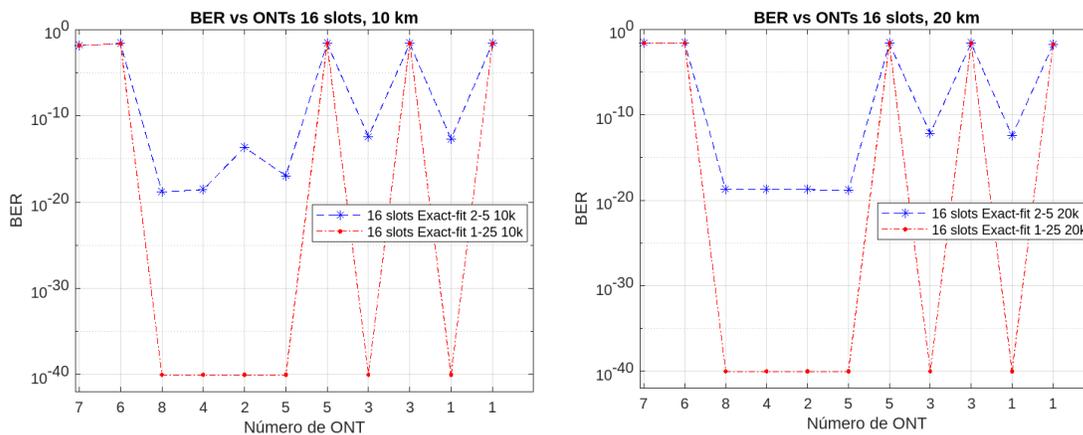


Figura 4.7. BER vs orden de asignación de ONTs en el espectro, exact-fit.

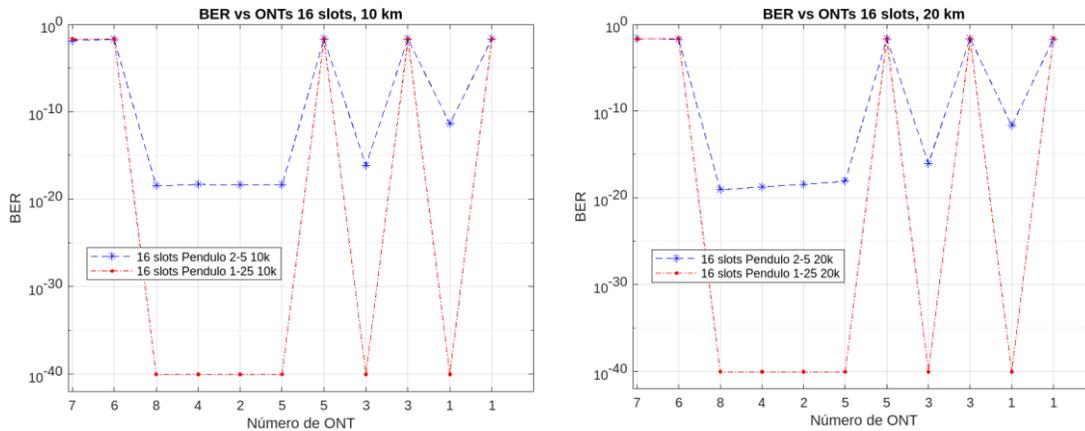


Figura 4.8. BER vs orden de asignación de ONTs en el espectro, péndulo.

En las figuras 4.7 y 4.8 los resultados arrojados en las ONTs: 8, 4, 2, 5, 3, 1 correspondiente a servicio de VoIP/datos, los cuales muestran un buen resultado en relación a la BER con un valor de $10e-40$ a distancia de 10km y 20km y una velocidad de 1.25Gbps para ambos algoritmos, por otra parte, se observa que, para velocidades de 2,5Gbps y las mismas distancias, se tiene un comportamiento más variable, es decir valores de BER que se encuentran entre $10e-13$ y $10e-19$, también se puede indicar que en péndulo es donde se tiene diferencia en los resultados para las ONTs 2 y 3, con un valor de BER de $10e-17$ mientras que para exact-fit los valores de BER está entre $10e-13$ y $10e-14$, basados en esto, el algoritmo que mejor se adapta y que presenta mejores rendimientos en el sistema es péndulo. Este comportamiento se debe a la forma en como cada algoritmo realiza la asignación del espectro dentro de la rejilla del sistema, en cuanto al servicio de video los resultados son muy similares en ambos algoritmos, cuyos resultados son buenos y están acordes dentro del rango del umbral esperado por el sistema correspondientes a las características iniciales con un BER de $10e-3$. Para finalizar podemos concluir que ambos algoritmos presentan un buen desempeño junto con la red, sin embargo, es péndulo quien tiene un mejor resultado, tal como se observó en la sesión de los resultados anteriormente analizados para 8 slots y 4 ONTs en relación a la BER.

En las Figuras 4.9 y 4.10 se muestran los resultados del Factor Q, por orden de asignación de espectro para cada ONT.

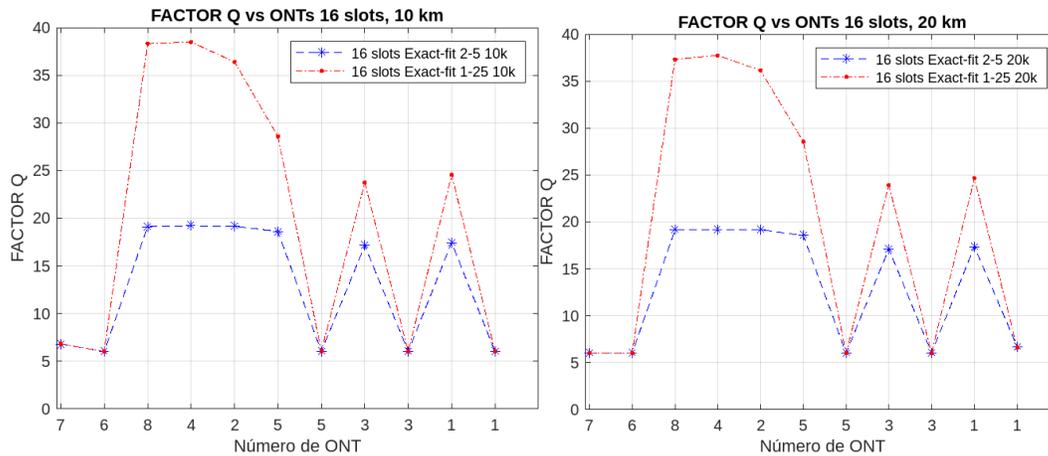


Figura 4.9. Factor Q vs orden de asignación de ONTs en el espectro, exact-fit.

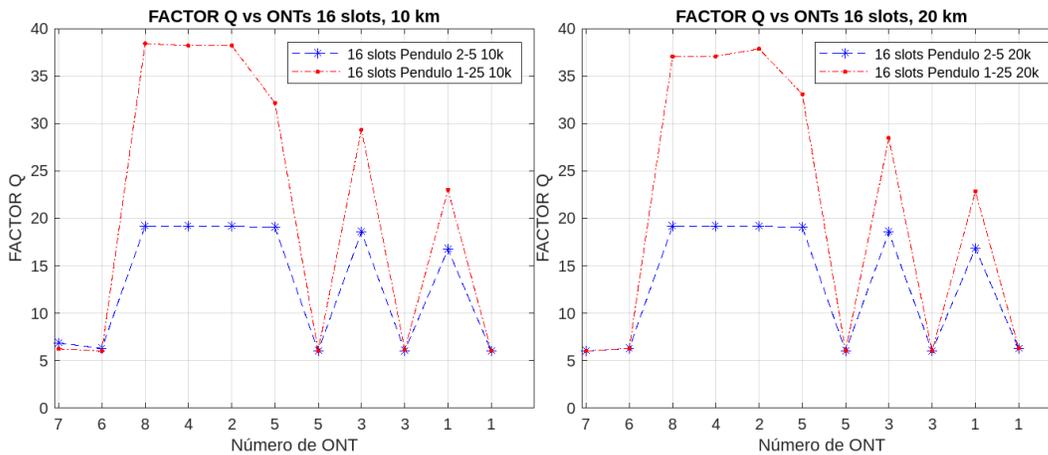


Figura 4.10. Factor Q vs orden de asignación de ONTs en el espectro, péndulo.

En las figuras 4.9 y 4.10 se muestra el comportamiento del sistema mediante el factor Q respecto a las ONTs, los servicios de video mantienen su estabilidad con un valor constante de alrededor de 6dB y 7dB, manteniendo un buen desempeño debido a que se conservan los parámetros establecidos inicialmente, también se observa que al igual que en el caso de factor Q anteriormente analizado, el sistema se comporta mejor a velocidad de 1,25Gbps, para distancias entre los 10km y 20 km de fibra hasta el hogar el cual arroja un factor Q de alrededor de 40 dB para el mejor caso y de alrededor de 24dB para el peor caso, lo cual indica que las ONTs están recibiendo su requerimiento dado que el sistema muestra un óptimo desempeño. En el caso de una velocidad de 2,5Gbps y distancias de 10km y 20 km arrojan un valor de alrededor de 17dB y 19 dB lo cual indica que el desempeño de la red es el adecuado. Para este caso de 16 slots y 8 ONTs junto a los datos obtenidos se indica que el algoritmo de péndulo es más eficiente, con lo cual satisface el desempeño de la red bajo estas condiciones.

En las Figuras 4.11, 4.12 se evidencian los resultados de Jitter, por orden de asignación de espectro para cada ONT.

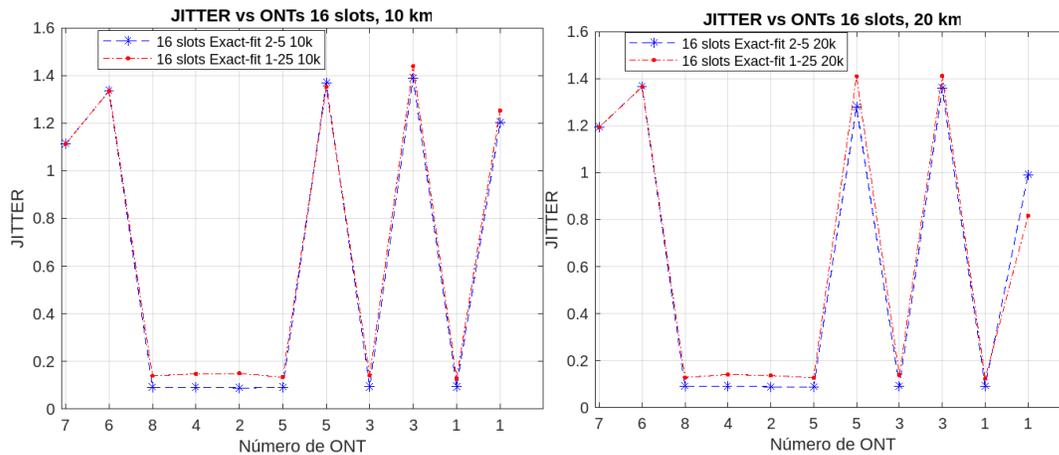


Figura 4.11. Jitter vs orden de asignación de ONTs en el espectro, exact-fit.

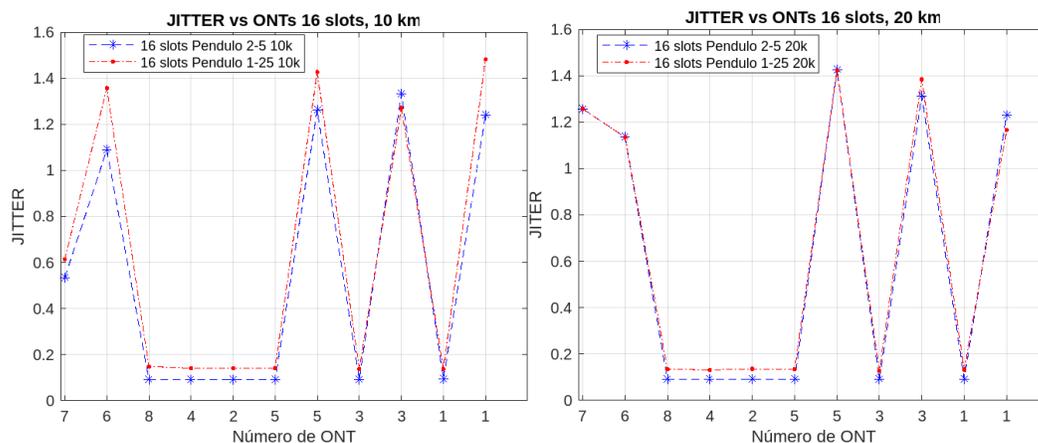


Figura 4.12. Jitter vs orden de asignación de ONTs en el espectro, péndulo.

En las Figuras 4.11 y 4.12 se muestra la asignación de los servicios para cada ONT en relación al Jitter, que genera desplazamientos en fase y conlleva a la presencia de interferencia inter simbólica (ISI).

De acuerdo a los estudios realizados previamente y a los resultados arrojados en BER y Factor Q, en los cuales se ha podido comprobar un correcto desempeño del sistema, así como también de los algoritmos implementados en la red se puede ver que los valores registrados en este apartado son similares, lo cual quiere decir que a diferentes números de ONTs el sistema se comporta de manera óptima.

En las figuras se puede apreciar un comportamiento estable en los valores arrojados por jitter, así mismo se expone que el mejor rendimiento es el de péndulo debido a sus bajos valores de este parámetro; de acuerdo a los datos

registrados en las ONTs 7 y 6 muestra un menor valor para velocidades de 2,5Gbps en comparación con los resultados arrojados por exact-fit. En general podemos decir que el sistema está dentro del margen de tolerancia, lo cual significa que la red cumple con el funcionamiento y prestación de servicios Triple Play.

Finalmente, como se observó entre los casos de estudio realizados para diferentes rejillas como lo son de 16 slots y 8 slots, a diferente número de ONTs, donde se varió la distancia para 10km y 20km y una velocidad de transmisión de 1,25Gbps y 2,5Gbps, con la incorporación de los algoritmos, exact-fit y péndulo dinámico, que de acuerdo con la evaluación de los parámetros de monitoreo del desempeño óptico en la red a nivel de acceso para la prestación de servicios Triple Play el resultado ha sido el esperado en el presente estudio, puesto que se logró obtener una buena respuesta del sistema mediante la prestación de los servicios triple play en una red que adoptó características de una red óptica elástica.

Con la culminación del comportamiento del desempeño de los algoritmos en la red y el desempeño a nivel físico de la señal transmitida a través de la red FTTH, se puede concluir que el diseño del algoritmo en la red se encuentra acorde a lo establecido en la literatura según las recomendaciones de transmisión de señal óptica para el servicio de telecomunicaciones. Finalmente, de acuerdo con el diseño planteado y simulado se tiene que tanto la red como el algoritmo se comporta de manera óptima a diferentes escenarios y fenómenos que se encuentran en un sistema óptico real.

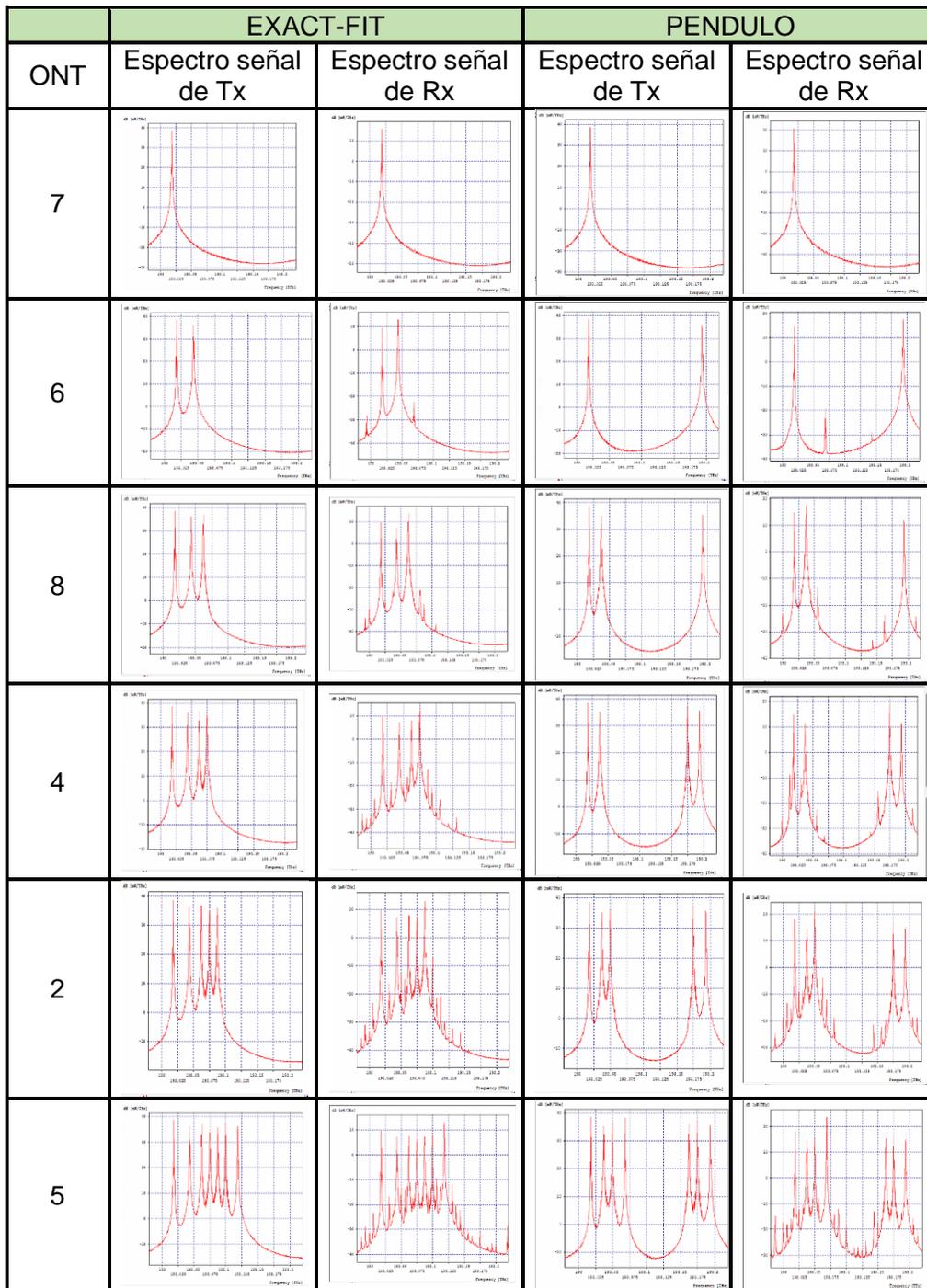
4.4. Ilustración de las gráficas de asignación de espectro de la señal de información en diferentes etapas de asignación del sistema.

A continuación, se muestran los resultados correspondientes al comportamiento de la asignación de espectro óptico para los servicios de Triple Play en las rejillas con 8slots y 16 slots, al incluir el algoritmo de exact-fit adaptado y el algoritmo diseñado (péndulo dinámico).

4.4.1 Asignación de 16 slots.

La asignación del espectro se muestra en la siguiente figura para 8 ONTs, a medida que los requerimientos llegan a la oficina central. Como se ha mencionado en el transcurso del trabajo el funcionamiento de los algoritmos esta evaluado desde el primer servicio en estricto orden de llegada de los requerimientos de cada ONT a la oficina central; la tabla 4.9 muestra el espectro de la señal asignada en transmisión y posteriormente recibida en recepción con una capacidad que comprende un total de 8 ONTs cuya orden de asignación ha

sido la siguiente 7, 6, 8, 4, 2, 5, 3, y 1. Cabe denotar que siempre a nivel espectral
 el algoritmo de péndulo va a ser mucho mejor péndulo que exact fit, además de
 esto en el límite de la grilla, y a un nivel muy alto de consumo de recursos, los
 dos algoritmos convergen en el mismo punto.



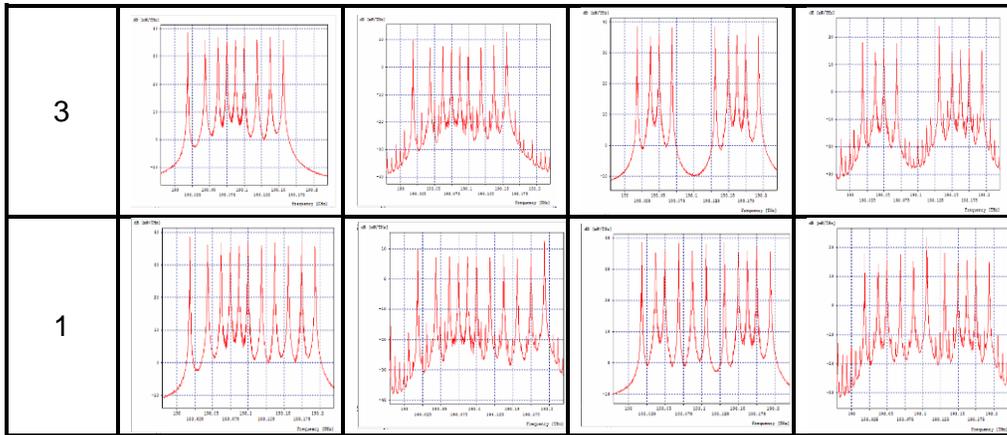
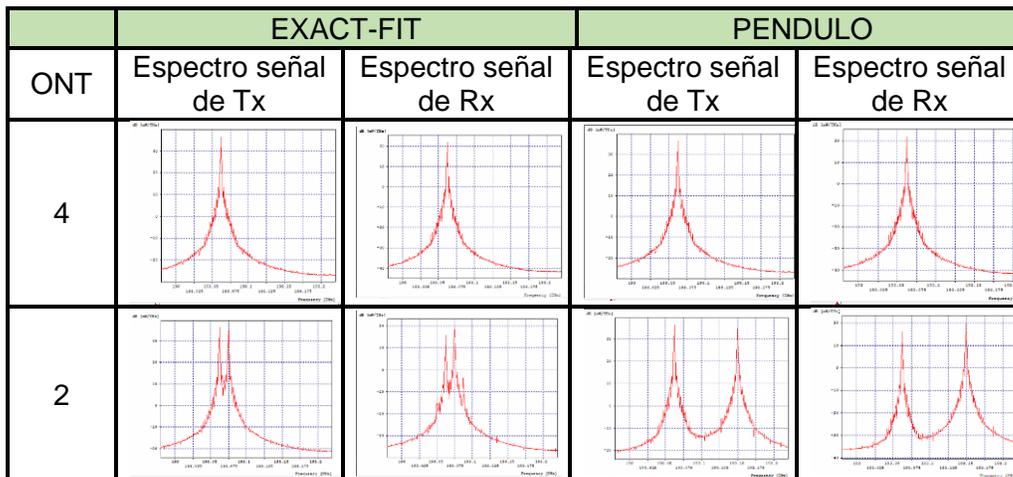


Tabla 4.9. Asignación de espectro para 16 slots.

El comportamiento de exact-fit es lineal asignando de izquierda a derecha hasta llenar su capacidad, debido a esto, este es un proceso que tarda más tiempo en buscar espacios disponibles puesto que cada vez que realiza un recorrido para un nuevo requerimiento debe realizar nuevamente el mismo proceso conllevando a mayor tiempo en busca de slots, mientras que para péndulo al imitar el movimiento pendular comienza con los extremos hasta llegar a su centro, este paso permite que el tiempo en búsqueda reduzca en un 50% con respecto exact-fit, de acuerdo con los resultados esto hace que los fenómenos presentes por contigüidad sea afectados en menor proporción en comparación con exact-fit, además dados los análisis el algoritmo que mejor se comporta por mejores resultados de acuerdo al desempeño de la red es péndulo el cual supera a exact-fit en 25% en relación de ONTS y de 24% para servicios, para una rejilla de 16 slots.

4.4.2 Asignación de 8 slots.



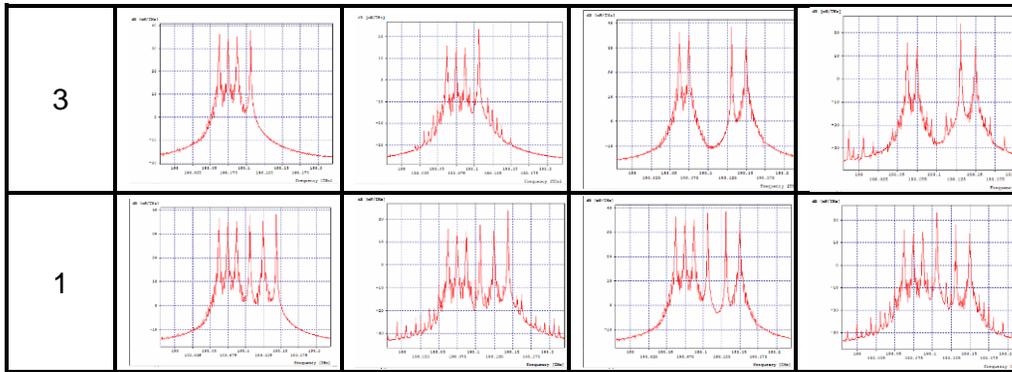


Tabla 4.10. Asignación de espectro para 8 Slots.

En la tabla 4.1 se muestra el mismo ejemplo anterior con la diferencia que este registro de asignación es para una rejilla de 8 slots, donde también se presenta el comportamiento del algoritmo de péndulo dinámico, el cual simula el movimiento de péndulo en busca de slots disponibles en la rejilla de espectro óptico, como se aprecia el inicia asignando el espectro óptico desde sus extremos hasta finalmente llegar a su centro si es el caso, también se observa como a medida que el espectro óptico se va ocupando la señal empieza a sufrir fenómenos típicos de la red, por otra parte, en cuanto al algoritmo exact-fit el funcionamiento de asignación de espectro es de izquierda a derecha en forma lineal. De acuerdo con el análisis y los resultados obtenidos con respecto a los algoritmos, el péndulo es el de mejor rendimiento de acuerdo al desempeño de la red, el cual supera a exact-fit en 33% en relación de ONTS y de 16% para servicios, para una rejilla de 8 slots.

4.5 Conclusiones.

- El estudio muestra que el desempeño de la red FTTH-EON al integrar el algoritmo péndulo representa una mejor respuesta a comparación con el algoritmo exact-fit.
- El algoritmo de péndulo implementado en el presente trabajo de grado permite una asignación dinámica y eficiente en cuanto al tipo de servicio, ya que, si una ONT requiere para su conexión servicio de VoIP/Internet y video simultáneamente, el algoritmo se encarga de asignar primero el servicio de Volp en espacio de slots disponible, y luego video, y estos no necesariamente tienen que estar contiguos.
- El algoritmo de Péndulo requiere menor tiempo para la asignación de un servicio a un usuario, esto gracias a su recorrido pendular, el cual permite pasar de un lado al otro encontrando así espacios disponibles con mayor rapidez que otros algoritmos, tal como el Exact-fit. Para los servicios de Volp/Internet la BER aumenta conforme el espectro de la señal óptica se va ocupando, esto se da debido a que las simulaciones se realizan en modo VBS full, lo cual garantiza una simulación con fenómenos no lineales. Y al haber bastantes señales con distinta frecuencia y cercanas entre sí en el total del espectro, aparecen dichos fenómenos que degradan la señal, por ende, en recepción se obtiene un peor desempeño del sistema, en cuanto a la BER.
- El entorno de simulación que ofrece la herramienta OptSim es un gran motor de simulación que permite modelar correctamente sistemas ópticos de datos complejos que se comparan a sistemas de la vida real, además proporciona una amplia librería con componentes más comúnmente utilizados en comunicaciones ópticas, que permiten un correcto modelamiento de sistemas ópticos.
- Para la integración de los componentes asociados al sistemas o módulos de Matlab y su correcto funcionamiento en las simulaciones, según la guía de soporte técnico que facilita OptSim, la herramienta debe ser configurada de acuerdo a la versión con la que se cuente, esto debido a que, si no se configura estos parámetros, existe una gran posibilidad de presentarse errores en la simulación, lo que conlleva a obtención de resultados erróneos.

4.6 Recomendaciones.

Para la implementación y simulación de sistemas FTTH-EON Triple Play se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

Para la simulación de las redes diseñadas es necesario contar con un equipo de cómputo de alta capacidad de procesamiento y de memoria, debido a que los sistemas diseñados, en especial al integrar un módulo de Matlab se caracteriza por ser un sistema complejo dentro de la librería de Co-simulación de OptSim.

Se recomienda hacer un buen uso de la información tanto de los conceptos teóricos a nivel de redes de acceso, sistemas ópticos y procesos de modulación como del uso de la herramienta de simulación, OptSim, para un desarrollo fluido en el trabajo de investigación.

Es importante definir una metodología de investigación y una metodología de simulación dentro del desarrollo del trabajo de investigación en vista de mejorar el orden de procesos y de iteraciones para obtener lo propuesto.

Definir apropiadamente el cronograma y el alcance del trabajo de investigación dado que la temática de redes PON, GPON y EON es muy extensa por lo que es muy sencillo desviar la idea principal por ideas secundarias y así no cumplir adecuadamente con los objetivos propuestos.

4.7 Trabajos futuros.

Este trabajo de investigación, aporta una base conceptual en relación a las temáticas involucradas en la prestación de servicios Triple Play con asignación dinámica de espectro, mediante slot, en Redes Ópticas Elásticas (EÓN). La cual servirá como base de estudio para futuros proyectos en relación a la temática tratada.

Se propone una serie de trabajos futuros que se listan a continuación:

- Analizar la implementación de una red FTTH-EON a un estándar de 40 Gbps y mayor distancia.
- Explorar herramientas que permitan el modelamiento del sistema en el que se pueda realizar el respectivo análisis de desempeño a nivel físico donde se pueda estudiar el enlace ascendente para servicios Triple Play.
- Analizar el desempeño a nivel físico de una red de acceso FTTH-EON en la prestación de servicios Triple Play con los algoritmos EXACT-FIT y Péndulo dinámico para un escenario que comprenda un número N de ONTs.
- Analizar el impacto al variar el tipo de modulación óptica a diferentes velocidades de transmisión.
- Desarrollar un análisis matemático de pendientes para los resultados gráficos de los parámetros OPM de esta investigación.
- Realizar un estudio de los servicios Quadplay al considerar un tipo de red EON en la utilización de RWA.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.

- [1] E. Fernando, A. Gerenas, I. Julieth, y R. Rodríguez, “El problema de enrutamiento y asignación de espectro en redes ópticas flexibles: una solución desde la perspectiva de la optimización”, Tesis de Pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, 2018.
- [2] D. F. Aguirre Moreno, O. J. Salcedo Parra, y J. E. Salamanca Céspedes, «Simulación de Redes Ópticas Flexibles de Tercera Generación con Net2plan», *redes ing.*, pp. 107-118, 1.
- [3] D. sharma, S. kumar, Una descripción general de las redes ópticas elásticas y sus tecnologías habilitadoras. 2017.
- [4] ITU-T Rec. G.872, Arquitectura de las redes ópticas de transporte. 2017, pp. 6–8.
- [5] G. P. Agraval, *Fiber-Optic Communications Systems*, Tercera Ed., vol. 6. New York, 2002.
- [6] “Esquema básico de un sistema WDM.” <https://www.fiberlabs.com/glossary/about-wdm/>.
- [7] ITU-T, “ITU-T G.694.1: Spectral Grids For WDM Applications: DWDM Frequency Grid,” 2020.
- [8] ITU-T, “ITU-T G.694.2: Spectral grids for WDM applications: CWDM Wavelength Grid,” 2003
- [9] ITU-T Rec. G.694.2, Plan de multiplexación por división aproximada de longitud de onda. 2003, pp. 1–2.
- [10] A. Sevilla Majin and E. Zúñiga Quisoboní, "Análisis comparativo del desempeño de algoritmos RSA y RWA sobre una red óptica basada en la topología NSFNET", Repositorio.unicauca.edu.co, 2017. Disponible en: <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/1573>.
- [11] R. Ramaswami, K. Sivarajan, and G. Sasaki, *Optical Networks: A practical Perspective*, Tercera Ed., vol. 66. 2012.
- [12] I. F. M. A. Velasco Andrade, Melo López. "Estudio de factibilidad técnico - económico para la implementación de una red FTTH/GPON en el contexto colombiano para servicios Triple Play". Principal. <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/1603>.

- [13] J. A. E. C. Duymovic García, Unigarro Santacruz, "Incidencia a Nivel Físico de la Técnica de Modulación M-QAM Sobre un Módulo RoF en una Red FTTH-GPON", Trabajo de Grado, Universidad del Cauca, Popayán, 2020.
- [14] G. Kramer, B. Mukherjee y A. Maislos, "Ethernet Passive Optical Network (EPON),"2004.
- [15] J. O. García Lozano, «Qué es FTTx y sus aplicaciones,» Telemediciones, 2016. [En línea]. Disponible: <http://telemediciones.com/blog/fibra-optica/que-es-fttx-y-sus-aplicaciones/>.
- [16] J. D. Delgado Lasso y J. C. Marcillo Bravo, «Impacto De La Topología De Red FTTH-GEPON En El Desempeño De Servicios Triple Play,» Trabajo de Grado. Universidad del Cauca. Popayán, 2016.
- [17] A. F. Escallón-Portilla, V. H. Ruíz-Guachetá, y J. G. López-Perafán, "Evaluación del desempeño físico de un sistema FTTH-GPON para servicios Quad Play después de la incorporación de un módulo RoF,." *Tecnológicas*, vol. 23, no. 47, pp. 23-61, 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.22430/22565337.1391>.
- [18] Liu, F., Comellas, J. Optimized traffic profile for FlexGrid optical networks. "Photonic network communications", 5 Maig 2017, p. 1-10.
- [19] F. Liu y J. Comellas, «Optimized traffic profile for FlexGrid optical networks», *Photonic Network Communications*, vol. 34, nº 3, pp. 334-343, 01 2017.
- [20] A. López de Lerma, "Algoritmos de planificación para redes elásticas," Tesis de Pregado, Departamento de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España, 2013.
- [21] G. Zhang, M. De Leenheer, A. Morea, and B. Mukherjee, "A Survey on OFDMBased Elastic Core Optical Networking," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 1–23, 2012, doi: 10.1109/SURV.2012.010912.00123.
- [22] P. M. Pereira, «Redes Ópticas Elásticas,» sao paulo: Universidad de Sao Paulo, Escuela de Ingeniería, 2013.
- [23] K. Deepak Sharma, «An Overview of Elastic Optical Networks and its Enabling Technologies,» *International Journal of Engineering and Technology*, 2017.

[24] Sayyad Khodashenas, P. Dynamic routing and spectrum allocation in elastic optical networks. Tesis doctoral, UPC, Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions, 2014.

[25] B. C. Chatterjee, N. Sarma, y E. Oki, "Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial", IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 17, núm. 3, pp. 1776–1800, 2015.

[26] A. Asensio Garcia, "Elastic spectrum allocation in flexgrid optical networks," Tesis de Pregado, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2012.

[27] S. C. Chagas, "Uma Abordagem Distribuída para o Problema de Roteamento e Alocação de Comprimentos de Onda em Redes WDM," Tesis Doctoral, Departamento de Ingenieria Electrica, Universidad de Brasilia, Brasília, Brasil, 2010.

[28] M. Klinkowski, M. Ruiz, L. Velasco, D. Careglio, V. Lopez, and J. Comellas, "Elastic Spectrum Allocation for Time-Varying Traffic in FlexGrid Optical Networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 31, no. 1, pp. 26–38, 2013, doi: 10.1109/JSAC.2013.130104.

[29] S. F. Atienza, "Simulación y optimización de redes ópticas elásticas: Estudio tecno-económico.," Tesis de Pregrado, Universidad de Valladolid, Valladolid, España, 2015.

[30] J. J. Granada-Torres, A. M. Cárdenas-Soto, y N. Guerrero-González, «Redes ópticas elásticas: un nuevo paradigma en las futuras redes de telecomunicaciones», Respuestas, vol. 20, n.º 2, pp. 6-22, jul. 2015.

[31] A. Cunha de Sousa, "Políticas de Alocação de Espectro em Roteamento baseado em Balanceamento de Cargas e Fragmentação para Redes Ópticas Elásticas," Tesis de Maestría, Universidad Federal de Pará, Pará, Brasil, 2015.

[32] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, and Y. Sone, "Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies," IEEE Communications Magazine, vol. 47, no. 11, pp. 66–73, 2009, doi: 10.1109/MCOM.2009.5307468.

[33] L. J. Jiménez Román, "Cognitive RSA for flexible optical networks," Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2015.

[34] A. N. Patel, P. N. Ji, J. P. Jue, and T. Wang, "Routing, Wavelength Assignment, and Spectrum Allocation in Transparent Flexible Optical WDM (FWDM) Networks," Photonics in Switching, 2010, doi: 10.1364/PS.2010.PDPWG1.

[35] O. Rival and A. Morea, "Elastic optical networks with 25–100G format-versatile WDM transmission systems," in OECC 2010 Technical Digest, 2010, pp. 100–101.

[36] S. Shakya, "Management of Spectral Resources in Elastic Optical Networks," Tesis Doctoral, Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad Estatal de Georgia, Atlanta, Estados Unidos, 2015.

[37] S. D. Ossa Hernández, J. A. Vargas Gutiérrez, y G. Gómez, "Propuesta de un algoritmo para la asignación dinámica de espectro en redes ópticas elásticas (EON)", *Lámpsakos*, (23), pp. 15-24. (enero-junio, 2020). DOI: 10.21501/21454086.3145.

[38] MathWorks, "Matlab y Simulink", [En línea]. Disponible en: https://la.mathworks.com/products.html?s_tid=gn_ps. [Accessed: 30-May-2022].

[39] A. Varga, "A Quick Overview Of The OMNeT ++ IDE," Budapest, Hungary, 2017. [En línea]. Disponible: <https://omnetpp.org/documentation/ide-overview/>.

[40] S. D. Software, «Optiwave Systems Inc.,» System Design Software, [En línea]. Disponible en: <http://www.optiwave.com>.

[41] RSOFTECH, "Diseño de Sistemas y Redes – OptSim.," USA, 2016.

[42] RSoft Design Group, Inc, "OptSim Guide", Ossining, NY, 2010.

[43] SYNOPSISYS, "OptSim Product Overview", 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/optsim.html>.

[44] R. I.-T. G.697, «"Supervisión óptica para sistemas de multiplexación por división en longitud de onda densa",» Junio, 2004.

[45] A. Escallón P., J. Barrios L., y A. Toledo T., "Incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana WDM," *Rev. Colomb. Tecnol. Av.*, vol. 2, no. 12, pp. 12-19, jul. 2008. Disponible en: http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_40/recursos/revistas/27102011/revista_12.jsp.

[46] R. Gallager, "Channels, Modulation and Demodulation," En: "Course Materials for 6450 Principles of Digital Communications I," MIT OpenCourseWare (<http://ocw.mit.edu/>), Massachusetts Institute of Technology, 2006. Descargado el [01-08-2021].

[47] J. Grijalba, G. Gómez, "Análisis del desempeño de formatos de modulación en comunicaciones ópticas sobre redes WDM," Trabajo de Grado., Depto., Teleco., Cauca Univ., Cauca, Colombia, 2010.

[48] Roger S. Pressman, Ingeniería de software – Un Enfoque Práctico. 2010.

[49] "Glossário para provedores: os principais termos para ISPs". Blog Intelbras. Disponible en: <https://blog.intelbras.com.br/glossario-para-provedores/>.

[50] E. Palushani, HC Hansen Mulvad, D. Kong, P. Guan, M. Galili y LK Oxenløwe, "Desmultiplexación OFDM totalmente óptica mediante aumento espectral y filtrado de paso de banda", Opt. Expreso 22, 136-144 (2014)