

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DE UN SISTEMA FTTH-GPON
PARA SERVICIOS *QUAD PLAY* AL INTEGRAR UN MÓDULO RoF**



**ANDRÉS FELIPE ESCALLÓN PORTILLA.
VÍCTOR HUGO RUIZ GUACHETÁ.**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES
Popayán, Cauca
2018.**

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO A NIVEL FÍSICO DE UN SISTEMA FTTH-GPON
PARA SERVICIOS *QUAD PLAY* AL INTEGRAR UN MÓDULO RoF**



**ANDRÉS FELIPE ESCALLÓN PORTILLA.
VÍCTOR HUGO RUIZ GUACHETÁ.**

Trabajo de Grado para optar al título de:

MAGÍSTER EN 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
MAESTRIA EN TELECOMUNICACIONES
Popayán, Cauca
2018.**

A Dios

Todo poderoso y fuente de inspiración

Con Amor

A mi Madre Luz Marina por darme la vida

A mi hija Valery Sofía por su bendita existencia

A toda la Familia Portilla Caicedo por todo su cariño y
colaboración incondicional

Andrés Felipe

Dedico este triunfo de todo corazón

A Dios mi guía, amigo y compañero en todo momento

A mis padres por su constante apoyo y por sus innumerables enseñanzas

A mis hermanos y toda mi familia, por su fuerza y amor

por su apoyo incondicional en los buenos y en los
malos momentos.

Víctor Hugo

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a: PhD. José Giovanni López Perafán, Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones y Director del proyecto, por sus valiosas orientaciones. A PhD. Pablo Jojoa, MSc. Alejandro Toledo, MSc. Claudia Hernández y MSc. Harold Romo, Ingenieros en Electrónica y Telecomunicaciones, por su valiosa colaboración y dedicación hacia nosotros para completar con éxito este trabajo de grado.

Es pertinente agradecer a Aldo Peruggia por facilitar la licencia más actualizada de la herramienta de simulación (OptSim) por 90 días. Además, se expresan agradecimientos especiales a PhD. Chaddi Assi (experto Canadiense) y a Jigesh Patel (Ing. de soporte de Rsoft) cuyo apoyo brindado fue muy importante para la consecución de los objetivos propuestos.

También agradecemos a nuestras familias y amigos por su apoyo incondicional en la consecución de nuestras metas.

Tabla de contenido

pág.

LISTA DE ACRÓNIMOS	14
INTRODUCCIÓN	18
1. CAPÍTULO I PRELIMINARES	20
1.1 PLANTEAMIENTO Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	20
1.2 OBJETIVOS	22
1.2.1 Objetivo General.....	22
1.2.2 Objetivos Especificos	22
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	23
1.4 ESTADO DEL ARTE	23
1.5 APORTES.	27
2. CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	28
2.1. GENERALIDADES DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES ÓPTICOS.....	28
2.1.1. Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM).	28
2.1.1.1. Multiplexación por división de longitud de onda ampliamente espaciada (CWDM). ..	29
2.1.2. Esquema General del Canal Óptico (OCh)	30
2.1.3. Tipos de Interconexión de Redes Ópticas.....	32
2.1.3.1. Red punto a punto	32
2.1.3.2. Red en cadena	33
2.1.3.3. Red en anillo.....	33
2.2. FUNDAMENTOS PARA EL MONITOREO DEL CANAL ÓPTICO BASADO EN OPM.....	34
2.2.1. Consideraciones en cuanto al desempeño de los sistemas DWDM.....	34
2.2.2. DEGRADACIONES ÓPTICAS Y PARÁMETROS DE MONITOREO ÓPTICO.....	35
2.2.3. Técnicas OPM.	39
2.3. PRINCIPIOS DE OFDM.....	40
2.3.1. Modulaciones multiportadora OFDM.....	41
2.3.2. Fundamentos básicos de OFDM.....	42

2.4.	SISTEMAS RoF.....	49
2.4.1.	Arquitectura de los Sistemas RoF.....	50
2.4.2.	Evolución y Tendencia De La Tecnología RoF.....	61
2.5.	TECNOLOGIA FTTx.....	63
2.5.1.	Arquitectura FTTx.....	64
3.	CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE DESARROLLO Y SIMULACIÓN.	71
3.1.	DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN.	71
3.1.1	Fundamentos Teóricos.	71
3.1.2	Formulación de la Metodología.....	72
3.2.	ESTUDIO PREVIO DE ALGUNAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN DE REDES ÓPTICAS. 73	
3.2.1.	Herramienta Software de Simulación.	74
3.3.	DISEÑO DE LA SIMULACIÓN CON LA HERRAMIENTA SOFTWARE OptSim.....	77
3.4.	DEFINICIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL.....	78
3.4.1.	Descripción General Modelo Conceptual de la Red FTTH-GPON	81
3.4.2.	Diseño conceptual del módulo de radio frecuencia sobre fibra óptica RoF.....	83
3.5.	DEFINICIÓN DEL MODELO DE RED EN EL ENTORNO DE SIMULACIÓN (OptSim).	86
3.5.1.	Diseño del Módulo RoF.	90
3.6.	ASPECTOS A CONSIDERAR DENTRO DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN.	96
4.	CAPÍTULO IV. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA RED FTTH-GPON PARA SERVICIOS <i>Quad Play</i>	99
4.1.	ANÁLISIS DE RESULTADOS, GRÁFICAS Y CONCLUSIONES DE LA INCIDENCIA DE LA DISPERSIÓN CROMÁTICA, ATENUACIÓN, DIAFONÍA Y EFECTOS NO LINEALES DE LA FIBRA ÓPTICA EN EL DESEMPEÑO DEL SISTEMA FTTH-GPON <i>Quad Play</i>	99
4.1.1.	Escenarios de Simulación para una sola ONT.	101
	104	
4.1.2.	Impacto cuando se integra el módulo RoF a la red FTTH-GPON.	128
4.2.	Escenarios de Simulación para varias ONT.....	136
5.	CAPÍTULO V. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS (TRABAJO FUTURO). 165	

5.1.	RESPECTO AL TRABAJO.....	165
5.2.	RESPECTO A LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN.	166
5.3.	RESPECTO A LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA Y A LA SIMULACIÓN.	167
5.4.	RECOMENDACIONES.....	172
5.5.	PERSPECTIVAS (TRABAJOS FUTUROS).....	174
6.	BIBLIOGRAFIA	180

INDICE DE TABLAS.

CAPITULO II

<i>Tabla 2-1 Degradaciones Ópticas. [Fuente: Rec. ITU-T G.697].</i>	37
<i>Tabla 2-2 Correlación entre las Degradaciones de Elevada Frecuencia de Ocurrencia y los Parámetros de Monitoreo[14].</i>	38
<i>Tabla 2-3 Degradaciones Ópticas y Parámetros de Monitoreo Óptico [14].</i>	39
<i>Tabla 2-4 Parámetros OPM Sugeridos [24].</i>	40
<i>Tabla 2-5 Estándares inalámbricos</i>	53
<i>Tabla 2-6 Comparación entre técnicas de generación y transporte para señales RoF</i>	61
<i>Tabla 2-7 Tipo de Red FTTX vs Distancia al usuario</i>	70

CAPITULO III

<i>Tabla 3.1 Parámetros técnicos establecidos para la implementación y simulación.</i>	87
<i>Tabla 3.2 Parámetros de configuración módulo RoF.</i>	95

CAPITULO IV

<i>Tabla 4.1. Variación de distancia empleada para las distintas simulaciones.</i>	107
<i>Tabla 4.2 Resumen de los parámetros OPM para el servicio de voz y datos.</i>	124
<i>Tabla 4.3 Resumen de los parámetros OPM para el servicio de video.</i>	125
<i>Tabla 4.4 Resumen de los parámetros OPM para el servicio de radio-telefonía celular- independiente.</i>	128
<i>Tabla 4.5 Resumen de los parámetros OPM para el servicio de radio-telefonía celular- integrado a la red FTTH-GPON.</i>	129
<i>Tabla 4.6 Resumen de los parámetros OPM para el servicio de voz y datos.</i>	129
<i>Tabla 4.7 Resumen de los parámetros OPM para el servicio de video.</i>	130
<i>Tabla 4.8 Resumen de los parámetros OPM para el servicio de radio-telefonía celular.</i>	131
<i>Tabla 4.9 Comparación del desempeño de los servicios de la red FTTH-GPON Triple Play vs Quad Play para una sola ONT de referencia.</i>	135
<i>Tabla 4.10 Distribución de Canales (DWDM) para los servicios Quad Play en la red FTTH-GPON.</i>	137
<i>Tabla 4.11 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON Quad Play para una ONT (Distancia constante).</i>	141
<i>Tabla 4.12 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON Quad Play para 2 ONT (Distancia constante).</i>	142
<i>Tabla 4.13 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON Quad Play para 4 ONT (Distancia constante).</i>	142
<i>Tabla 4.14 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON Quad Play para 8 ONT (Distancia constante).</i>	142
<i>Tabla 4.15 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON Quad Play para 16 ONT (Distancia constante).</i>	143
<i>Tabla 4.16 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON Quad Play para 32 ONT (Distancia constante).</i>	144
<i>Tabla 4.17 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON Quad Play para 64 ONT (Distancia constante).</i>	145

Tabla 4.18 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON Quad Play para una ONT (Distancia variable)	149
Tabla 4.19 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON Quad Play para dos ONT (Distancia variable)	150
Tabla 4.20 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON Quad Play para cuatro ONT (Distancia variable)	151
Tabla 4.21 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON Quad Play para ocho ONT (Distancia variable)	152
Tabla 4.22 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON Quad Play para 16 ONT (Distancia variable)	153
Tabla 4.23 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON Quad Play para 32 ONT (Distancia variable)	156
Tabla 4.24 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON Quad Play para 64 ONT (Distancia variable)	159
Tabla 4.25. Comparación del desempeño de los servicios de la red FTTH-GPON Quad Play para varias ONT especificando el alcance máximo	163

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO 2

Figura 2.1 Esquema básico del funcionamiento de un sistema WDM. Para cada uno de los canales hay un láser emitiendo a diferente frecuencia. [18]----- 29

Figura 2.2 Esquema General del OCh [18].----- 31

Figura 2.3 Esquema Básico del OCh. ----- 32

Figura 2.4 Esquema del OCh con OADM. ----- 32

Figura 2.5 Red Punto a Punto [18]. ----- 33

Figura 2.6 Red en Cadena [18]. ----- 33

Figura 2.7 Red en Anillo [18]. ----- 33

Figura 2.8 Dimensionamiento de Factores Críticos en Sistemas DWDM [18].----- 35

Figura 2.9 Fuentes de deterioro de la calidad de transmisión en DWDM [13].----- 36

Figura 2.10 Canal multitrayecto en OFDM [26].----- 42

Figura 2.11 Transmisión en OFDM [26].----- 43

Figura 2.12 a) Interespaciado de subportadoras en OFDM. b) Detalle del espaciado entre subportadoras en OFDM [26] [27].----- 44

Figura 2.13 Espaciado de 15Khz entre subportadoras de OFDM [27].----- 44

Figura 2.14 Transmisor OFDM [28].----- 45

Figura 2.15 15 IFFT en OFDM [28].----- 46

Figura 2.16 El símbolo OFDM aparece como periódico debido a la inserción del CP ----- 47

Figura 2.17 Receptor OFDM [28].----- 48

Figura 2.18 Proceso de demodulación OFDM [28]. ----- 48

Figura 2.19 Sistema de radio sobre fibra [6].----- 51

Figura 2.20 Redes de acceso heterogéneas de banda ancha de próxima generación [9].----- 52

Figura 2.21 Configuración de un sistema de comunicaciones de Radio sobre fibra óptica [31].----- 52

Figura 2.22 Arquitectura de un sistema RoF [5]. ----- 54

Figura 2.23 Receptor digital coherente para sistemas RoF-PM [31].----- 55

Figura 2.24 Esquema de una modulación de Intensidad y Detección Directa [31].----- 58

Figura 2.25 Esquema de modulación de la señal banda base y RF con modulador MZM [31]. ----- 60

Figura 2.26 Clases de FTTx [35]. ----- 65

Figura 2.27 Fibra hasta el hogar [36]. ----- 66

Figura 2.28 Fibra hasta el Gabinete [37]. ----- 67

Figura 2.29 Fibra hasta el nodo [37]. ----- 68

Figura 2.30 Configuración FTTH [37]. ----- 69

CAPITULO III

Figura 3.1 Diseño de la Simulación ----- 78

Figura 3.2 Escenario General. ----- 79

Figura 3.3 Esquema General de un Enlace con Multiplexación [18]. ----- 79

<i>Figura 3.4 Modelo General de Red sin Módulo RoF [44].</i>	80
<i>Figura 3.5 Modelo General del Transmisor de la Red con el Módulo RoF.</i>	80
<i>Figura 3.6 Modelo Conceptual.</i>	81
<i>Figura 3.7. Red FTTH-GPON PROPUESTA EN [44].</i>	82
<i>Figura 3.8 Diagrama del sistema de generación de la señal de microondas/milimétrica [31].</i>	84
<i>Figura 3.9 Diagrama general del sistema de radio/fibra.</i>	84
<i>Figura 3.10 Modulación Externa [31].</i>	85
<i>Figura 3.11 Modelo General de la Red FTTH-GPON Triple Play [45].</i>	87
<i>Figura 3.12 Configuración de la señal de video mejorada.</i>	88
<i>Figura 3.13 Modelo General de la Red FTTH-GPON Triple Play 1ONT con el video mejorado.</i>	89
<i>Figura 3.14 Parámetros de desempeño red FTTH-GPON Triple Play: a) Diagrama del ojo señal de datos. b) Diagrama del ojo señal de video.</i>	89
<i>Figura 3.15 Sistema de Radio sobre fibra óptica utilizando modulación en fase.</i>	91
<i>Figura 3.16 a) Transmisor OFDM. b) Receptor OFDM [48].</i>	91
<i>Figura 3.17 Módulo OFDM back-to-back.</i>	92
<i>Figura 3.18 a) Señal teórica de OFDM RF-modulada. b) Señal simulada de OFDM RF-modulada. c) Diagrama teórico de constelación 16-QAM. d) Diagrama simulado de constelación 16-QAM.</i>	93
<i>Figura 3.19 Modulo de RoF para una ONT.</i>	94
<i>Figura 3.20 Red FTTH-GPON con el módulo RoF integrado.</i>	94
<i>Figura 3.21 configuración red FTTH-GPON con módulo RoF para 4ONT.</i>	95
<i>Figura 3.22 Esquema General para los Escenarios de Simulación con Multiplexación WDM.</i>	97

CAPITULO IV

<i>Figura 4.1. Red FTTH-GPON Triple Play con una sola ONT.</i>	102
<i>Figura 4.2 a) Señal de datos y VoIP. b) Señal eléctrica de datos y VoIP después del NRZ en el dominio del tiempo.</i>	102
<i>Figura 4.3. a) Señal eléctrica de datos y VoIP después del NRZ en el dominio frecuencia. b) Espectro de frecuencia señal en el Transmisor para VoIP y Datos.</i>	103
<i>Figura 4.4. a) Señal de video en el Transmisor. b) Señal de video modulada en 16QAM en el dominio tiempo.</i>	103
<i>Figura 4.5. a) Señal de video modulada en 16QAM en el dominio de la frecuencia. b) Diagrama de constelación señal de video modulada en 16QAM.</i>	104
<i>Figura 4.6. a) Señal de video a la salida del modulador MZM. b) Señal de video y datos después del combinador del lado del transmisor.</i>	104
<i>Figura 4.7. a) Señal de video y voz/datos antes de pasar a los filtros para ser separadas. b) Señal de voz/datos después de pasar por el filtro.</i>	105
<i>Figura 4.8. a) Señal de Datos en el receptor en el dominio eléctrico y tiempo. b) Señal de Datos en el receptor en el dominio eléctrico y frecuencia.</i>	105
<i>Figura 4.9. Diagrama del ojo para la señal de voz/datos.</i>	106
<i>Figura 4.10. a) Señal de video en el dominio de la frecuencia en el receptor. b) Diagrama de constelación en el demodulador 16QAM.</i>	106

<i>Figura 4.11. . Diagrama del ojo de la señal de video.</i> -----	107
<i>Figura 4.12. Espectro en frecuencia de los diferentes servicios de la red FTTH GPON en el canal óptico.</i> -----	108
<i>Figura 4.13. a) BER vs Distancia para la señal de voz/datos. b) Potencia de Recepción eléctrica vs Distancia para la señal de voz/datos.</i> -----	108
<i>Figura 4.14. Diagrama de Ojo en función de la Distancia para la señal de voz/datos.</i> -----	109
<i>Figura 4.15. a) BER vs Distancia para la señal de video. b) Potencia de Recepción eléctrica vs Distancia para la señal de video.</i> -----	109
<i>Figura 4.16. Diagrama de Ojo en función de la Distancia para la señal de video.</i> -----	110
<i>Figura 4.17. Esquema general del módulo RoF.</i> -----	111
<i>Figura 4.18. a) Señal de la fuente de datos a 10 Gbps. b) Señal de la fuente de datos convertida a paralelo cada una a 2.5 Gbps.</i> -----	111
<i>Figura 4.19. a) Señal “I” después del modulador 16QAM en el dominio del tiempo. b) Señal “I” después del modulador 16QAM en el dominio de la frecuencia.</i> -----	112
<i>Figura 4.20. Diagrama de constelación en fase y cuadratura de la señal del modulador 16QAM.</i> -----	112
<i>Figura 4.21. . a) Señal OFDM en el dominio del tiempo. b) Señal OFDM en el dominio de la frecuencia.</i> -----	113
<i>Figura 4.22. a) Señal OFDM (RF) en el dominio del tiempo. b) Señal OFDM (RF) en el dominio de la frecuencia.</i> -----	113
<i>Figura 4.23. Señal RoF en el transmisor.</i> -----	114
<i>Figura 4.24. a) Señal RoF en el transmisor. b) Señal RoF en el receptor.</i> -----	114
<i>Figura 4.25. a) Señal RoF en el receptor en el dominio eléctrico temporal. b) Señal RoF en el receptor en el dominio eléctrico espectral.</i> -----	115
<i>Figura 4.26. a) Señal OFDM en el receptor dominio de la frecuencia. b) Señal RF en el receptor dominio de la frecuencia banda base.</i> -----	115
<i>Figura 4.27. a) Señal OFDM en el receptor dominio de la frecuencia. b) Constelación en cuadratura y fase de la señal de radio en el receptor.</i> -----	116
<i>Figura 4.28. a) Señal recuperada en paralelo. b) Señal recuperada en serie.</i> -----	116
<i>Figura 4.29. a) Espectro en frecuencia del canal RoF de muestra (194 THz) en el canal óptico variando la distancia. b) Potencia óptica de recepción vs distancia.</i> -----	117
<i>Figura 4.30. a) EVM vs distancia. b) BER vs distancia.</i> -----	117
<i>Figura 4.31. Red FTTH-GPON con el módulo RoF integrado para una sola ONT.</i> -----	118
<i>Figura 4.32. a) Señal de datos en el Transmisor. b) Señal de Datos a la salida del NRZ.</i> -----	119
<i>Figura 4.33. a) Señal de datos en el dominio de la frecuencia a la salida del NRZ. b) Señal de datos en el dominio óptico a 1490 nm (201,2 THz).</i> -----	119
<i>Figura 4.34. a) Señal de video en el Transmisor a 0,8 Gbps. b) Señal de video en el Transmisor modulada en 16QAM (dominio del tiempo).</i> -----	119
<i>Figura 4.35. a) Señal de video en el Transmisor modulada en 16QAM (dominio de la frecuencia). b) Diagrama constelación Señal de video en el Transmisor modulada a 16QAM.</i> -----	120
<i>Figura 4.36. a) Portadora Señal de video a 1550 nm (193,4 THz) en el Transmisor en el dominio óptico. b) Señal de la Fuente de datos en el Transmisor RoF a 10 Gbps.</i> -----	120
<i>Figura 4.37. a) Señal de la Fuente de datos en el Transmisor RoF en paralelo a 2,5 Gbps cada una. b) Señal de la Fuente de datos en el Transmisor RoF modulada en 16QAM.</i> -----	120

<i>Figura 4.38. a) Señal de la Fuente de datos en el Transmisor RoF modulada en 16QAM dominio frecuencia. b) Diagrama de constelación Señal de la Fuente de datos en el Transmisor RoF modulada en 16QAM.</i>	121
<i>Figura 4.39. a) Señal OFDM en el Transmisor RoF con 8 subportadoras dominio eléctrico. b) Señal OFDM en el Transmisor RoF con 8 subportadoras en el dominio frecuencia.</i>	121
<i>Figura 4.40. a) Señal OFDM en el Transmisor RoF a 10 GHz en el dominio tiempo. b) Señal OFDM en el Transmisor RoF a 10GHz en el dominio frecuencia.</i>	121
<i>Figura 4.41. Señal OFDM en la portadora óptica en el Transmisor RoF en 194THz.</i>	122
<i>Figura 4.42. a) Señales Quad Play (voz/datos, video y radio) ingresando al canal óptico. b) Señales Quad Play (voz/datos, video y radio) saliendo del canal óptico.</i>	123
<i>Figura 4.43. Señal datos después del filtro pasa banda en la ONT.</i>	123
<i>Figura 4.44. a) Señal de voz/datos en el dominio eléctrico temporal. b) Señal de voz/datos en el receptor en el dominio de la frecuencia.</i>	124
<i>Figura 4.45. Diagrama del ojo para la señal de voz/datos.</i>	124
<i>Figura 4.46. . Señal óptica de video después del filtro en la ONT.</i>	125
<i>Figura 4.47. a) Diagrama del ojo de la señal de video. b) Diagrama de constelación de la señal de video.</i>	126
<i>Figura 4.48. a) Señal OFDM en la portadora óptica después del filtro. b) Señal Radio OFDM en el dominio del tiempo.</i>	126
<i>Figura 4.49. a) Señal OFDM en el dominio de la frecuencia. b) Señal de radio después del módulo FFT en el dominio del tiempo.</i>	127
<i>Figura 4.50. a) Señal de radio después del módulo FFT en el dominio de la frecuencia. b) Diagrama en fase y cuadratura después del módulo FFT.</i>	127
<i>Figura 4.51. a) Señal de radio después del demodulador (paralelo). b) Señal de radio totalmente recuperada (serie).</i>	128
<i>Figura 4.52. a) Diagrama del ojo red FTTH-GPON-RoF servicio de voz/datos. b) Diagrama del ojo red FTTH-GPON sin RoF servicio de voz/datos.</i>	130
<i>Figura 4.53. a) Diagrama del ojo red FTTH-GPON-RoF servicio de video. b) Diagrama del ojo red FTTH-GPON sin RoF servicio de video.</i>	131
<i>Figura 4.54. Espectro de frecuencias canal óptico para los cuatro servicios de la red FTTH-GPON.</i>	132
<i>Figura 4.55. a) BER vs distancias para la señal de voz/datos. b) Relación de potencia vs distancia para la señal de voz/datos.</i>	132
<i>Figura 4.56. Diagramas de ojo servicio de voz/datos.</i>	133
<i>Figura 4.57. a) Diagramas de ojo para la señal de video. b) Relación Potencia vs Distancia señal de video.</i>	133
<i>Figura 4.58. Espectro de frecuencias en el canal óptico para el servicio de radio-telefonía celular.</i>	134
<i>Figura 4.59. a) EVM vs distancia para señal de radio. b) BER vs distancia para señal de radio.</i>	134
<i>Figura 4.60. . Modelo general del sistema FTTH-GPON Quad Play para 2 ONT.</i>	139
<i>Figura 4.61. Modelo general del sistema FTTH-GPON Quad Play para 4 ONT.</i>	139
<i>Figura 4.62. Modelo general del sistema FTTH-GPON Quad Play para 8 ONT.</i>	139
<i>Figura 4.63. Modelo general del sistema FTTH-GPON Quad Play para 16 ONT.</i>	140
<i>Figura 4.64. Modelo general del sistema FTTH-GPON Quad Play para 32 ONT.</i>	140
<i>Figura 4.65. Modelo general del sistema FTTH-GPON Quad Play 64 ONT.</i>	141

LISTA DE ACRÓNIMOS

AI:	(<i>Alarm Indicator</i>). Indicador de Alarma.
AON:	(<i>All-Optical Networks</i>). Redes Totalmente Ópticas.
APS:	(<i>Automatic Protection Switching</i>). Conmutación de Protección Automática.
ASE:	(<i>Amplified Spontaneous Emission</i>). Emisión Espontánea Amplificada.
ASON:	(<i>Automatic Switched Optical Networks</i>). Redes Ópticas de Conmutación Automática.
ATM:	(<i>Asynchronous Transfer Mode</i>). Modo de Transferencia Asíncrono.
AWGN:	(<i>Additive White Gaussian Noise</i>). Ruido Gaussiano Blanco Aditivo.
BER:	(<i>Bit Error Rate</i>). Tasa de Error de Bit.
BW:	(<i>BW, BandWidth</i>). Ancho de Banda.
CATV:	(<i>Cable Television</i>). Televisión por Cable.
CWDM:	(<i>Coarse Wavelength Division Multiplexing</i>). Multiplexación por División de Longitud de Onda Ampliamente Espaciada.
DCF:	(<i>Dispersion Compensating Fiber</i>). Fibra Compensadora de Dispersión.
DCM:	(<i>Dispersion Compensation Module</i>). Módulo de Compensación de Dispersión.
DE:	(<i>Dispersion Equalizer</i>). Ecuador de Dispersión.
DFB:	(<i>Distributed Feedback</i>). Realimentación Distribuida.
DML:	(<i>Directly Modulated Laser</i>). Láser Modulado Directamente.
DSF:	(<i>Dispersion Shift Fiber</i>). Fibra de Dispersión Modificada.
DSL:	(<i>Digital Subscriber Line</i>). Línea de Suscriptor Digital.
DWDM:	(<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>). Multiplexación por División de Longitud de Onda Densamente Espaciada.
EA-DFB:	(<i>Electroabsorption modulator integrated- Distributed FeedBack</i>). Realimentación Distribuida integrada con un modulador de Electroabsorción.
EDFA:	(<i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i>). Amplificador de Fibra Dopada con Erbio.
ELH:	(<i>Extra Long Haul</i>). Extra Larga Distancia.
EML:	(<i>Externally Modulated Laser</i>). Láser Modulado Externamente.
E-NNI:	(<i>External-Network to Network Interface</i>). Interfaz de Red Externa a Red Externa.
ESCON:	(<i>Enterprise Systems Connection</i>). Conexión de Sistemas Empresariales.
ESNR:	(<i>Electrical Signal to Noise Ratio</i>). Relación Señal a Ruido Eléctrica.
ESR:	(<i>Errored Seconds Rate</i>). Tasa de Segundos con Error.
EAM:	(<i>Electro-Absortion Modulator</i>). Modulador de Electro-Absorción.
EVM:	(<i>Error Vector Magnitude</i>). Magnitud del Vector de Error.
FEC:	(<i>Forward Error Correction</i>). Corrección de Errores en Recepción.
FIU:	(<i>Fiber Interface Unit</i>). Unidad de Interfaz de Fibra.
FSO:	(<i>Free Space Optics</i>). Óptica de Espacio Libre.
FTTH:	(<i>Fiber To The Home</i>). Fibra Hasta La Casa.
FWM:	(<i>Four Wave Mixing</i>). Mezcla de Cuatro Ondas.
GMPLS:	(<i>Generalized Multiprotocol Label Switching</i>). Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo Generalizado.
GPON:	(<i>Gigabit Passive Optical Networks</i>).Redes Ópticas Pasivas Gigabit.
GVD:	(<i>Group Velocity Dispersion</i>). Dispersión de Velocidad de Grupo.
IETF:	(<i>Internet Engineering Task Force</i>). Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

I-NNI:	(<i>Internal- Network to Network Interface</i>). Interfaz de Red Interna a Red Interna.
IP:	(<i>Internet Protocol</i>). Protocolo de Internet.
ISI:	(<i>InterSymbol Interference</i>). Interferencia entre Símbolos.
ISP:	(<i>Internet Service Provider</i>). Proveedor de Servicio de Internet.
ITU:	(<i>International Telecommunications Union</i>). Unión Internacional de Telecomunicaciones.
LAN:	(<i>Local Area Networks</i>). Redes de Área Local.
LCK:	(<i>Locked</i>). Enganchado.
MAN:	(<i>Metropolitan Area Networks</i>). Redes de Área Metropolitana.
MZM:	(<i>Mach-Zehnder Modulator</i>). Modulador Mach-Zehnder.
MCA:	(<i>Multi-Channel spectrum Analyzer unit</i>). Unidad Analizadora de espectro Multicanal.
MPLS:	(<i>Multiprotocol Label Switching</i>). Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo.
MS:	(<i>Maintenance Signal</i>). Señal de Mantenimiento.
NC:	(<i>Network Controller</i>). Controlador de Nodo.
NDSF:	(<i>Non Dispersion Shift Fiber</i>). Fibra de Dispersión No Modificada.
NGF:	(<i>New Generation Fiber</i>). Fibra de Nueva Generación.
NMS:	(<i>Network Management System</i>). Sistema de Gestión de Red.
NRZ:	(<i>Non Return to Zero</i>). No Retorno a Cero.
NZDSF:	(<i>Non Zero Dispersion Shifted Fiber</i>). Fibra de Dispersión Modificada No Cero.
OA:	(<i>Optical Amplifier</i>). Amplificador Óptico.
OADM:	(<i>Optical Add/Drop Multiplexer</i>). Multiplexor Óptico de Inserción/Extracción.
OC:	(<i>Open Connection</i>). Conexión Abierta.
OCC:	(<i>Optical Connection Controller</i>). Controladores de Conexión Óptica.
OCh:	(<i>Optical Channel</i>). Canal Óptico.
OCM:	(<i>Optical Channel Monitoring</i>). Monitoreo del Canal Óptico.
OD:	(<i>Optical Demultiplexer</i>). Demultiplexor Óptico.
ODU:	(<i>Optical channel Data Unit</i>). Unidad de Datos del Canal Óptico.
O-E-O:	(<i>Optical-Electrical-Optical</i>). Óptica-Eléctrica-Óptica.
OEQ:	(<i>Optical Equalizer</i>). Ecuador Óptico.
OLA:	(<i>Optical Line Amplifier</i>). Amplificador de Línea Óptico.
OM:	(<i>Optical Multiplexer</i>). Multiplexor Óptico.
OMS:	(<i>Optical Multiplex Section</i>). Sección de Multiplexación Óptica.
OOK:	(<i>On-Off Keying</i>). Llaveado Encendido - Apagado.
OPC:	(<i>Optical Phase Conjugation</i>). Conjugación de Fase Óptica.
OPE:	(<i>Optical Power Equalizer</i>). Ecuador de Potencia Óptico.
OPM:	(<i>Optical Performance Monitoring</i>). Monitoreo de Desempeño Óptico.
OPU:	(<i>Optical channel Payload Unit</i>). Unidad de Carga Útil del Canal Óptico.
OFDM:	(<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>). Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal.
OSA:	(<i>Optical Spectrum Analyzer</i>). Analizador de Espectro Óptico.
OSC/OTC:	(<i>Optical Supervisory Channel unit or Supervisory Channel and Timing Transporting</i>). Unidad de Canal de Supervisión Óptica o Unidad de Canal de Supervisión y Transporte de Temporización.
OSNR:	(<i>Optical Signal to Noise Ratio</i>). Relación Señal a Ruido Óptica.
OTDR:	(<i>Optical Time-Domain Reflectometer</i>). Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo.
OTDV:	(<i>Optical Time-Domain Visualizer</i>). Visualizador Óptico en el Dominio del Tiempo.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

OTM:	(<i>Optical Terminal Multiplexer</i>). Multiplexor Terminal Óptico.
OTN:	(<i>Optical Transport Network</i>). Red de Transporte Óptica.
OTS:	(<i>Optical Transmission Section</i>). Sección de Transmisión Óptica.
OTU:	(<i>Optical Transponder Unit</i>). Unidad de Transponder Óptica.
OXC:	(<i>Optical Cross Connect</i>). Conector Cruzado Óptico.
O&AM:	(<i>Operation, Administration & Management</i>). Operación, Administración y Gestión.
PBU:	(<i>Power Backup Unit</i>). Unidad de Resguardo de Energía.
PDH:	(<i>Plesiochronous Digital Hierarchy</i>). Jerarquía Digital Plesiócrona
PIN:	(<i>Positive-Intrinsic-Negative</i>). Positivo-Intrinseco-Negativo.
PMD:	(<i>Polarization Mode Dispersion</i>). Dispersión por Modo de Polarización.
PON:	(<i>Passive Optical Networks</i>). Redes Ópticas Pasivas.
POP:	(<i>Point Of Presence</i>). Punto de Presencia.
POTS:	(<i>Plain Old Telephone Services</i>). Servicios Telefónicos Tradicionales.
PPC:	(<i>Protection Control Channel</i>). Canal de Control de Protección.
PPM:	(<i>Protocol Performance Monitoring</i>). Monitoreo de Desempeño del Protocolo.
QAM:	(<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>). Modulación por Amplitud en Cuadratura.
QoS:	(<i>Quality of Service</i>). Calidad de Servicio.
Q Factor:	(<i>Quality Factor</i>). Factor de Calidad.
REG:	(<i>Regenerator</i>). Regenerador.
RIN:	(<i>Relative Intensity Noise</i>). Ruido de Intensidad Relativa.
RoF:	(<i>Radio-over-Fiber</i>). Radio sobre Fibra.
RPU:	(<i>Raman Pump Amplifier Unit</i>). Unidad Amplificadora de Bombeo Raman.
RZ:	(<i>Return to Zero</i>). Retorno a Cero.
SBS:	(<i>Stimulated Brillouin Scattering</i>). Difusión Estimulada de Brillouin.
SCC:	(<i>System Control & Communication unit</i>). Unidad de Comunicación y Control de Sistema.
SDH:	(<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>). Jerarquía Digital Síncrona.
SESR:	(<i>Severely Errored Seconds Rate</i>). Tasa de Segundos con Muchos Errores.
SLA:	(<i>Service Level Agreement</i>). Acuerdo de Nivel de Servicio.
SNMP:	(<i>Simple Network Management Protocol</i>). Protocolo de Gestión de Red Simple.
SNR:	(<i>Signal to Noise Ratio</i>). Relación Señal a Ruido.
SONET:	(<i>Synchronous Optical Network</i>). Red Óptica Síncrona.
SPM:	(<i>Self-Phase Modulation</i>). Automodulación de Fase.
SRS:	(<i>Stimulated Raman Scattering</i>). Difusión Estimulada de Raman.
TDM:	(<i>Time Division Multiplexing</i>). Multiplexación por División de Tiempo.
ULH:	(<i>Ultra Long Haul</i>). Ultra Larga Distancia.
UNI:	(<i>User to Network Interface</i>). Interfaz de Usuario a Red.
WDM:	(<i>Wavelength Division Multiplexing</i>). Multiplexación por División de Longitud de Onda.
XPM:	(<i>Cross-Phase Modulation</i>). Modulación de Fase Cruzada.
3R:	(<i>Reshape - Retime - Retransmit</i>). Reformar - Retemporizar - Retransmitir.

RESUMEN

Este trabajo de Maestría ha estudiado los sistemas de Radio sobre Fibra (*RoF, Radio-over-Fiber*) aplicados a servicios *Quad Play* (voz/datos, video, y radio - telefonía celular) para tecnologías *FTTH* arrojando un aporte significativo para que exista una referencia sobre la cual seguir trabajando en proyectos futuros, en concordancia con las demandas a nivel mundial de estas tecnologías inalámbricas/ ópticas. Adicionalmente, las distintas empresas del sector de telecomunicaciones a nivel local, nacional e internacional estarían interesadas en los resultados del trabajo final con el fin de tomarlo como referencia a la hora de implementar los servicios *Quad Play* sobre sus redes de Fibra Hasta La Casa con tecnología de Redes Ópticas Pasivas Gigabit (*FTTH-GPON, Fiber To The Home-Gigabit Passive Optical Networks*) *Triple Play* existentes. Por ello, se resolvió la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál sería el desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF? La respuesta a la anterior pregunta justifica el presente trabajo de investigación aplicada ya que está acorde con la convergencia actual de redes y servicios de radio sobre fibra. Para lo anterior se utilizó la herramienta de simulación OptSim con el fin de analizar el sistema *FTTH-GPON* para servicios *Quad Play*. Entonces, se caracterizó a nivel de simulación la red *FTTH-GPON* a evaluar. Se diseñó el módulo de Radio Frecuencia (*RF, Radio Frequency*) basado en un sistema de Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (*OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) con Modulación por Amplitud en Cuadratura (*QAM, Quadrature Amplitude Modulation*) 16 a una tasa de transmisión de datos de 10 Gbps y a una frecuencia de 10 GHz en OptSim. Luego se integró el módulo *RoF* a la red *FTTH-GPON* (servicio de voz/datos – *VoIP/Internet* a 2.5 Gbps y servicio de video -*CATV digital-con 16 QAM a 0.8 Gbps*), y se analizó su desempeño. Finalmente, se evaluó el desempeño a nivel físico de la red *FTTH-GPON*, al integrar el módulo *RoF*, con base en los parámetros de Monitoreo de Desempeño Óptico (*OPM, Optical Performance Monitoring*), entre los cuales se destacan: atenuación, dispersión cromática, diafonía, efectos no lineales de la fibra óptica, Magnitud del Vector de Error (*EVM, Error Vector Magnitude*), Relación Señal a Ruido (*SNR, Signal to Noise Ratio*), Tasa de Error de Bit (*BER, Bit Error Rate*), Factor de Calidad (*Q Factor, Quality Factor*), diagrama del ojo y diagrama de constelación.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad es cada vez más notorio el incremento en el número de los usuarios de las redes de telecomunicaciones y también de la diversidad y complejidad de los servicios que estos demandan. Las exigencias de ancho de banda, diferenciación y calidad en los servicios, gestión de recursos, etc., por parte de los operadores de las redes y los proveedores de servicio y de los usuarios, es cada día más difícil de satisfacer, lo cual requiere que se desarrollen y apropien nuevos métodos de manejo de información, tecnologías de red y prestación de servicios. En general, un sistema de monitoreo entrega información eficiente para garantizar que la fibra óptica esté lista para usarse en el momento preciso requerido, mejorando así la rentabilidad de su inversión, el óptimo nivel de utilización y aprovechamiento de la red y la calidad de los servicios ofrecidos. Dado que las redes actuales incluyen varios elementos ópticos transparentes entre los puntos de regeneración eléctricos, se hace necesario efectuar la comprobación de la calidad de desempeño en el dominio óptico para evaluar el comportamiento del canal óptico, tal como se afirma en la Rec. ITU-T G.697.

El presente trabajo de grado es un paso en la consolidación del conocimiento en el área de la Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de Telecomunicaciones. Específicamente busca resolver la necesidad de evaluar el desempeño a nivel físico de un sistema FTTH_GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF, estableciendo un avance y valioso aporte, lo cual se constituirá en una guía factible de ser adoptada por los operadores de este tipo de redes.

Con el fin de abordar los temas necesarios para el desarrollo de este trabajo de grado, el contenido consta de 5 capítulos que se distribuyen de la siguiente manera:

Capítulo 1. Preliminares

En esta sección se define el planteamiento del problema, los objetivos, la justificación, el estado del arte y los aportes del presente trabajo de grado.

Capítulo 2. Marco Teórico y Conceptual.

Es una recopilación de los fundamentos relacionados con las comunicaciones ópticas e inalámbricas y su convergencia. Trata sobre los fundamentos de las redes ópticas, la técnica WDM, además de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica como: atenuación, dispersión cromática, efectos no lineales, diafonía (crosstalk), jitter; y los fundamentos de OPM, además de realizar una descripción sobre cómo hacer un adecuado monitoreo del canal óptico basado en OPM, de donde es posible extraer algunos criterios teóricos relacionados. Se describen los principios de OFDM, la arquitectura RoF y finalmente se habla de todo lo relacionado con las tecnologías FTTH.

Capítulo 3. Metodología de Desarrollo y Simulación.

Se describe la metodología de desarrollo y su aplicación a la simulación. También incluye el estudio previo de las herramientas de simulación de redes ópticas y la selección de la herramienta más conveniente. Finalmente, se realiza el modelo conceptual de la simulación, y se define una red FTTH-GPON *Quad Play* como un modelo (abstracción de la realidad), realizando el diseño de la simulación en diferentes escenarios, en el entorno que ofrecen la herramienta software OptSim para realizar el monitoreo de las señales que soportan los servicios *Quad Play*.

Capítulo 4. Evaluación del Desempeño de la red FTTH-GPON *Quad Play*.

Se realiza un estudio sobre OPM avanzado, se implementan los escenarios de simulación con el fin de determinar el comportamiento de los servicios *Quad Play*, se analizan los resultados y las conclusiones de la simulación; finalmente se analiza la incidencia de la atenuación, dispersión cromática, diafonía, y efectos no lineales de la fibra óptica al integrar un módulo RoF en el desempeño de la red FTTH-GPON propuesta, y se definen los criterios para un adecuado monitoreo de las señales que soportan los servicios *Quad Play*.

Capítulo 5. Conclusiones, Recomendaciones y Perspectivas (trabajo futuro).

Se da una serie de conclusiones, recomendaciones y perspectivas a futuro, obtenidas del desarrollo del trabajo de grado.

1. CAPÍTULO I PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La revolución de las telecomunicaciones a partir del desarrollo de Internet ha sido de tal magnitud que la convergencia tecnológica hoy ya es una realidad. El desarrollo de la tecnología ha permitido que las aplicaciones clásicas como texto, audio, imágenes y videos, coexistan dentro de una misma red. Esto ha generado y demandado nuevos usos para los computadores conectados a la red, como ver videos y películas, escuchar radio, música y hablar por teléfono [1]. El teléfono móvil brinda cada vez más prestaciones y se convierte en un dispositivo inteligente multimedia que permite múltiples servicios a los tradicionales para satisfacer las necesidades de los usuarios.

Por otro lado, la digitalización permite un uso más eficiente de las redes, a menores costos y a la vez impulsa el desarrollo de nuevos servicios y aplicaciones, tales como video bajo demanda, foto blogs, video *logs* (*vlogs*), descargas y *streaming* de video, plataformas personalizadas de televisión y puesta on-line de contenidos. Todo conlleva a que se le brinde al usuario una experiencia nueva, ofreciendo a los consumidores los servicios de comunicación e información que requieren en el momento y en el lugar donde se encuentren con las mejores condiciones. Muchos proveedores de contenidos de todo el mundo están utilizando Internet para llegar con su programación a los sitios más alejados del globo, disponiendo así de una plataforma alternativa de mucho más alcance y potencial [1] [2]; Estos proveedores de telecomunicaciones en gran parte del mundo ofrecen servicios *Triple Play* y algunos ya hablan de servicios *X-Play* para el usuario final. Todos estos servicios se ofrecen a través de internet teniendo que disponer para ello de una plataforma robusta y competitiva para dicho fin.

En concordancia con lo mencionado en [3], [4] los usuarios finales están exigiendo una conexión inalámbrica permanente desde sus dispositivos móviles a una gran velocidad de transmisión de datos, sin necesidad de dirigirse a puntos de acceso cableados. No obstante, los servicios inalámbricos no poseen suficiente ancho de banda para proporcionar capacidades de transmisión grandes. Actualmente, las redes *Gigabit Ethernet* (*GbE*) suministran hasta 1 Gb para sistemas inalámbricos, y se tiene la expectativa de la implementación de 10 *GbE*. Cabe recalcar que para las transmisiones a velocidades de *multi-Gbps*, se están estudiando los posibles escenarios de implementación de sistemas inalámbricos operando a Frecuencias Portadoras Extremadamente Altas (*EHF*, *Extremely High Frequency*), cuyo rango oscila entre los 30 y 300 GHz. Dicho rango de frecuencias se conoce como la Banda de Ondas Milimétricas (*MMW*, *Millimeter Wave*), que dispone de más ancho de banda en el rango de los GHz. Citando a países desarrollados como Corea del Sur y Estados Unidos, el uso de la frecuencia de los 60 GHz cada día se está masificando. Por tal razón se está estudiando el ancho de banda de los sistemas inalámbricos que operan alrededor de los 60 GHz a nivel mundial; por ejemplo, el grupo IEEE 802.15.3c se enfoca en distancias de transmisión de rango corto de hasta 10 m y se proponen sistemas inalámbricos internos en el rango de las *MMW* para la provisión de velocidades mayores que 1 *Gbps*. Para el desarrollo de sistemas que trabajen en bandas de *MMW* se presentan problemas, como por ejemplo, el costo de los equipos electrónicos utilizados y el aumento de las estaciones base (*BS*, *Base Station*) que deberían implementarse. Además, la transmisión de señales de *MMW* necesita mayor potencia, debido a las altas pérdidas en el medio inalámbrico, lo cual genera inconvenientes en la implementación. Algunos de estos

inconvenientes se solucionan con la tecnología de radio sobre fibra (*RoF, Radio-over-Fiber*), la cual se presenta como una de las soluciones más prometedoras para las redes de acceso en el mundo [4].

La ventaja de usar la fibra óptica como medio para transmitir señales de MMW son: su inmunidad a las interferencias electromagnéticas, la gran capacidad de transmisión, pérdidas en la propagación entre los 0,2 y 0,5 dB/km (dependiendo del tipo de fibra utilizada), la longitud de onda de operación, siendo estos valores muy bajos con respecto a medios de transmisión como el cobre y el aire. Por otra parte, los sistemas *RoF* que operan en la banda *MMW* requieren de celdas pequeñas debido a la corta distancia de propagación; de hecho, los enlaces de radio de *MMW* están siendo considerados para la implementación de sistemas micro o pico celulares de banda ancha, redes de acceso y redes inalámbricas internas [5] [6].

Por otro lado se tiene también que la demanda de tasas de transmisión altas y gran ancho de banda en redes fijas e inalámbricas se ha incrementado en los últimos años y muestra un comportamiento similar en los años subsiguientes. Un estudio realizado por Cisco *Systems* publicó un reporte donde se pronostica que el tráfico de datos a nivel mundial para el 2018, donde el tráfico del protocolo de internet (*IP, Internet Protocol*) mundial anual superará el umbral del *Zettabyte*. Según Cisco durante el periodo 2012 y 2017 el tráfico del segmento metropolitano ha venido creciendo al doble que el tráfico de la red troncal; se predice también que para el 2017 alrededor de la mitad del tráfico IP de consumo se generará en dispositivos que no son Computadores Personales (*PC, Personal Computer*) y este crecerá alrededor del 49% en comparación con el 26% del año 2012. Con estos resultados se espera que para el año 2017 los dispositivos conectados a la red cableada representen aproximadamente el 45% del tráfico IP, mientras que el 55% de dicho tráfico estará generado por redes *Wi-Fi* y dispositivos móviles, lo que implicará un gran aumento de ancho de banda demandado por los dispositivos móviles [4] [6].

De acuerdo al análisis anterior, actualmente se observa que las redes de acceso ópticas pueden proporcionar un amplio ancho de banda para los usuarios finales, mientras que las redes inalámbricas ofrecen movilidad a los usuarios, pero no cumplen con los requerimientos de ancho de banda demandado por los mismos. Además, tener redes de acceso separadas genera altos costos de operación y mantenimiento para los proveedores de servicios. Todo esto demanda la necesidad de una convergencia de dichas redes en una sola infraestructura compartida para la futura distribución de contenidos (*X-Play*) para usuarios fijos y móviles; con base en esto, los sistemas de Radio sobre Fibra (*RoF, Radio-over-Fiber*) y Fibra Hasta el Hogar (*FTTH, Fiber To The Home*) son las tecnologías más apropiadas para consolidarse en el segmento de redes de acceso inalámbrico y fijo respectivamente, debido a la movilidad y al gran ancho de banda que soportan. A pesar de que los sistemas *RoF* se pueden implementar en redes troncales logrando cubrir grandes distancias, el gran atractivo de estos sistemas radica en que se pueden utilizar en redes de acceso inalámbrico de banda ancha que permita el transporte y la distribución de las portadoras de Radio Frecuencia (*RF*) de cualquier red inalámbrica utilizando una infraestructura de red de acceso *FTTH* [4] [5].

Es pertinente mencionar que al transmitir señales en espacio libre para frecuencias en la banda de las microondas, la atenuación que se puede presentar es de aproximadamente 10 dB/Km o más, en comparación con la transmisión de señales usando por ejemplo una fibra óptica estándar monomodo cuya atenuación está alrededor de los 0,2 dB/Km en la ventana de 1550 nm o de 0.35 dB/Km en la ventana de los 1310 nm; este hecho, sumado al gran ancho de banda que ofrece la fibra, constituyen una de las principales razones por las cuales son atractivas las tecnologías de transmisión *RoF*. Teniendo en cuenta este escenario, surge la pregunta y el desafío de cómo transmitir señales de radio frecuencia (*RF*) en redes ópticas *FTTH* usando una sola

longitud de onda sobre fibra de manera que se garantice una calidad aceptable y que el costo-beneficio sea atractivo [6].

Hasta el momento se han realizado diferentes investigaciones y trabajos alrededor de sistemas RoF tal y como se exponen en [4], en los cuales se muestran las ventajas de implementar dichos sistemas en diferentes escenarios y aplicaciones. Además se discute las tecnologías que permiten desarrollar los sistemas *RoF*, algunas técnicas para la implementación de redes de acceso-inalámbricas basadas en la modulación externa utilizando el modulador *Mach-Zehnder*, estudio comparativo de las técnicas de generación de señales para el transporte de información sobre sistemas *RoF* usando técnicas de combinación óptica, y análisis un modelo analítico para la generación de señales para sistemas RoF.

Teniendo en cuenta todo lo expresado anteriormente y sabiendo que en Colombia cada día los usuarios demandan más ancho de banda por los múltiples servicios que utilizan en su diario vivir, se hace necesario realizar un estudio de los sistemas *RoF* aplicados a servicios *Quad Play* (voz, video, datos, y servicio celular) para tecnologías *FTTH*, ya que al interior de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca aún no se ha trabajado con el tema propuesto ni a nivel de pregrado ni de posgrado; por lo tanto, este proyecto sería un aporte significativo para que exista 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. Adicionalmente, las distintas empresas del sector de telecomunicaciones a nivel local y/o nacional estarían interesadas en los resultados del trabajo final con el fin de tomarlo como referencia a la hora de implementar los servicios de *Quad Play*. Por ello, se plantea la siguiente pregunta:

¿Cuál sería el desempeño¹ a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios QUAD PLAY al integrar un módulo RoF?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General.

Evaluar el desempeño a nivel físico de un sistema *FTTH-GPON* para servicios *Quad Play* al integrar un módulo de *RoF*.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a nivel de simulación la red *FTTH-GPON* a evaluar.
- Diseñar el módulo de Radio Frecuencia (RF) en una herramienta Software.

¹ Entiéndase como desempeño, el análisis de los parámetros del sistema *FTTH-GPON* tales como: atenuación, OSNR, BER, factor Q, diagrama del ojo, entre otros, en concordancia con los Parámetros de Desempeño Óptico (*OPM, Optical Performance Monitoring*) a nivel físico.

- Integrar el módulo *RoF* a la red *FTTH-GPON*, y analizar su desempeño mediante una herramienta de simulación.
- Evaluar el desempeño a nivel físico de la red *FTTH-GPON*, al integrar el módulo *RoF*, con base en los parámetros de Monitoreo de Desempeño Óptico (OPM) mediante una herramienta de simulación.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto de investigación aplicada, está acorde con la línea de investigación de los grupos I+D GRIAL (Grupo de Radio e InALámbricas) y GNTT (Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones), con el cual se busca abordar la interacción entre tecnologías inalámbricas sobre fibra óptica *RoF*. Adicionalmente el sistema *RoF* será aplicado a servicios *Quad Play*, por lo cual distintas empresas del sector de Telecomunicaciones estarían interesadas en los resultados del trabajo final con el fin de tomarlo como referencia a la hora de implementar los servicios de *Quad Play*.

Al interior del departamento de Telecomunicaciones la Universidad del Cauca aún no se ha trabajado con el tema propuesto ni a nivel de pregrado ni de posgrado; por lo tanto, sería 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.

1.4. ESTADO DEL ARTE

Es importante destacar que los trabajos relacionados se han desarrollado dentro de un contexto internacional o nacional, pero no existen trabajos afines con los objetivos del presente proyecto de Maestría dentro de la Universidad del Cauca, entre los trabajos más relevantes están:

- **Las posibilidades de las nuevas tecnologías audiovisuales en Argentina:** este es un artículo en donde se hace un análisis de los servicios *Triple Play* y *Quad Play* en el país de Argentina, cuales están regulados y cuáles no, también se explica cuáles son los servicios que se catalogan como *Quad Play* y los beneficios que trae al sector de las telecomunicaciones [1]. Este artículo aporta al desarrollo de este proyecto, en el sentido que brinda una diferencia entre servicios *Triple Play* y *Quad Play*.
- **Foto-transceptor para sistemas RoF y RoFSO usando un mezclador optoelectrónico basado en PHEMT:** este artículo describe la aplicación de los mezcladores optoelectrónicos auto oscilantes basados en el uso de transmisiones pseudomórficos de alta movilidad electrónica sobre un sistema *RoF*, se trabajan con diferentes longitudes de onda, se muestran los resultados de la caracterización electroóptica en un ambiente de total oscuridad como de luminosidad. se muestran los resultados también para la banda de GSM [7], como resultados principales de este trabajo se obtuvo gráficamente en oscuridad total el punto de óptimo de operación del *PHEMT* (mezclador optoelectrónico auto oscilante basado en el uso de transistores pseudomórficos de alta movilidad electrónica) en términos de la ganancia máxima del dispositivo, se mostró también experimentalmente que el *PHEMT* iluminado, la foto-corriente es dependiente del estado de polarización del Haz de luz

monocromática; se concluye también experimentalmente que el mezclador opto-electrónico auto oscilante posee amplios rangos de mezclado dentro de los 5 GHz de oscilación local, lo que permite su uso para sistemas *RoF*. Este proyecto es de gran aporte al desarrollo del presente trabajo, porque da ideas claras de cómo implementar una red *RoF*, con la diferencia de que el proyecto que se propone, se analizarán sus parámetros de desempeño para servicios *Quad Play* en una red *FTTH-GPON*.

- **Análisis de sistemas de generación y transporte de señales de MMV en sistemas RoF A 60 GHz:** el propósito de este trabajo es analizar las funcionalidades y prestaciones de las técnicas más utilizadas para generar señales de microondas/milimétricas, con el fin de identificar las más adecuadas que permitan generar señales en la banda de 60 GHz para un sistema de Radiofrecuencia sobre fibra (*RoF*). Así mismo, se analizan los efectos que introduce el canal en el transporte de la señal y finalmente evaluar su rendimiento mediante simulaciones de sus Figuras de Merito particularizadas para los esquemas planteados. Dentro de sus principales resultados cabe destacar que la modulación de fase supera a la modulación de intensidad aun cuando no esté configurada con sus parámetros de correcto funcionamiento. Además con la escasa complejidad, el esquema que se propone, permite utilizar señales de modulación sobre los 15 GHz, es decir, puede generar señales sobre los 60 GHz. Las simulaciones de las figuras de mérito corroboran dichos resultados de manera más exacta aparte que mediante ellas permite de alguna forma pronosticar el comportamiento de la técnica con otros valores de configuración [8]. Este proyecto está muy relacionado con el que se propone, con la diferencia que se analizarán con servicios *Quad Play* en una red *FTTH-GPON*.
- **Software de simulación de diferentes tipos de modulación de señales de radio frecuencia sobre fibra óptica:** en este artículo se presenta una herramienta software de simulación, en donde se toman diferentes señales moduladas en radio frecuencia sobre fibra y se hace un análisis de desempeño, en el dominio de la frecuencia, del tiempo y el dominio óptico, esta situación se hace en un entorno totalmente gráfico en donde como resultado final del proyecto muestra que la herramienta *RoFSIM* y *LabVIEW* fue la seleccionada para realizar dicha simulación [9]. Este trabajo puede aportar al desarrollo del que se propone, en el sentido en que se da una idea de cómo montar y caracterizar una señal de radio sobre fibra y de qué manera se puede analizar; además se diferencia del presente proyecto ya que trabajara con un servicio *Quad Play* en un sistema *RoF*.
- **Hacia la próxima generación de sistemas de Radio sobre Fibra de banda ancha: retos tecnológicos en la banda de las ondas milimétricas:** En este artículo se presenta una revisión de los trabajos científicos más relevantes de la tecnología de radio sobre fibra. Se exponen los aspectos más importantes en la evolución del estado del arte de esta tecnología, basado en la descripción de sus principales dispositivos y las pruebas experimentales más recientes que sugieren la integración entre las redes inalámbricas y cableadas. En este trabajo se identificó una tendencia hacia el incremento en la frecuencia de la portadora de radiofrecuencia en la banda de las ondas milimétricas (75 - 100 GHz), que indican que la próxima generación de sistemas de radio sobre fibra operará en esta banda de gran capacidad disponible [5]. Este artículo es un soporte teórico para el desarrollo del presente proyecto, ya que se presentan diferentes trabajos sobre *RoF* y las diferentes tecnologías que se utilizan, el cual serán un punto de partida para el diseño del sistema que se pretende analizar en este proyecto.

- **Generación de señales para sistemas radio sobre fibra basada en combinación óptica:** Este artículo presenta un estudio comparativo de técnicas de generación de señales para el transporte de información en sistemas de *RoF* usando técnicas de combinación óptica. En estos sistemas las portadoras de radiofrecuencia se transportan como subportadoras de canal óptico sobre un enlace en conexiones punto-punto o punto-multipunto, entre los resultados más relevantes, se muestra que los índices de modulación para los esquemas de brazo doble y serial presentan una fuerte dependencia entre sí, mientras que la configuración en paralelo permiten una mayor flexibilidad en la selección de los índices de modulación [10]. Este trabajo se diferencia con el propuesto, ya que se trabajará *RoF* para servicios *Quad Play* en una red *FTTH-GPON*.
- **Modelo analítico de generación de señales para sistemas radio sobre fibra:** Este artículo presenta un modelo analítico que describe los elementos involucrados en la generación de señales proclives de ser usadas en sistemas de radio sobre fibra para el transporte de información. En estos sistemas las portadoras de radiofrecuencia se transportan como subportadoras de canal óptico sobre un enlace de fibra óptica en conexiones punto-punto o punto-multipunto. El modelo tiene como base la definición del campo eléctrico y potencia a la salida del modulador óptico que conjuga una señal modulada en banda base y una señal de radiofrecuencia en cualquier banda, donde se llega al siguiente resultado: Mediante modelado de la función de campo se encuentra que los índices de modulación presentan una fuerte dependencia entre sí y se obtiene su valor óptimo a fin de garantizar una buena calidad para ambas señales en el receptor. [6]. El presente artículo es un buen referente analítico para el proyecto que se propone, ya que será de gran aporte para la selección de los parámetros en la generación de señales *RoF*.
- **Convergencia de sistemas de comunicación ópticos e inalámbricos:** Este artículo explora las tendencias en los sistemas de comunicación de convergencia óptico-inalámbrica y profundiza en el papel que las tecnologías ópticas están jugando en la construcción de la red de convergencia. Para el trabajo de maestría es una buena referencia para la parte de convergencia óptico/inalámbrico [11].
- **Next-generation optical access networks:** Este artículo trata sobre el principal problema que tienen las redes actuales, el cuello de botella que se presenta en el segmento de red. Para abordar esta problemática están las tecnologías de acceso de banda ancha por fibra, como las redes *PON* (*redes ópticas pasivas*) que se presentan como una solución indispensable. La industria ha seleccionado la División por Multiplexación de Tiempo (*TDM, Time Division Multiplexing*) para los despliegues *PON* actuales. Sin embargo, para satisfacer futuras demandas de ancho de banda, las redes de próxima generación *PON* están siendo investigadas para proporcionar un mejor desempeño. En este artículo, se revisa los *TDM-PON* actuales; y luego se termina utilizando tecnologías de multiplicación por división de longitud de onda (*WDM*) [12]. Este artículo es de gran aporte para el desarrollo del presente trabajo, ya que sirve como referente teórico cuando se inicie a caracterizar la red *FTTH/GPON*.
- **Fibre/radio for the provision of cordless/mobile telephony services in the access network:** en este artículo se ha demostrado un sistema de fibra / radio CT2 de cuatro canales sobre fibra monomodo utilizando técnicas de multiplexación de subportadoras. Se consiguió un rango dinámico eléctrico libre de espurios de 51 dB que es suficiente para un alcance móvil de aproximadamente 100 m. El uso de la multiplexación de subportadora simplifica el diseño del transceptor de radio y permite

que el equipo de procesamiento complejo se ubique en la central local [13]. Este artículo es un gran aporte para el desarrollo del proyecto que se propone ya que ayudará a definir las características que se deben tener en cuenta cuando se proponga el módulo *RoF*.

- **Local-oscillator-free wireless-optical-wireless data link at 1.25 Gbit/s over a 40 GHz carrier employing carrier preservation and envelope detection:** En este artículo se demuestra un sistema inalámbrico-óptico-inalámbrico libre de oscilador local a 1,25 Gbps / s sobre una portadora de 40 GHz y 100 km de fibra, *Fibra de Dispersión Desplazada Casi Nula (NZ-DSF, Non Zero Dispersion Shift Fiber)* que emplea la rectificación óptica de media onda, la remodulación del portador y la detección de envolvente [14]. Este artículo es un referente teórico para el desarrollo del proyecto que se propone, ya que ayudara a definir las características que se deben tener en cuenta cuando se proponga el módulo *RoF*.
- **Radio-over-fiber transport for the support of wireless broadband services:** en este artículo se revisan algunos de los trabajos llevados a cabo dentro de la Red de Excelencia de la institución UE ISIS sobre sistemas de radio sobre fibra para el apoyo de redes inalámbricas actuales y emergentes. Además se ha investigado la modulación directa por láser y los enlaces modulados externamente, y se presentan demostraciones de sistemas de fibra monomodo y fibra multimodo. Es clave mencionar que las redes inalámbricas estudiadas abarcan desde redes de área personal (como *ZigBee* y *Ultra Wideband*) a través de redes de área local inalámbricas a redes inalámbricas de área metropolitana (*WiMAX*) y sistemas de comunicaciones móviles de tercera generación. Finalmente se demuestra que el rendimiento de la transmisión de radio sobre fibra hace referencia a las especificaciones de la norma relevante, donde se verifica el funcionamiento del protocolo y se implementan demostraciones de red completas [15]. Este artículo aporta al desarrollo de este proyecto porque es importante el contexto desarrollado sobre el transporte de *RoF* para el soporte de servicios, que para el caso particular, serán los de *Quad Play*.
- **Experimental Demonstration for Delivering 1-Gbps OFDM Signals over 80-km SSMF in 40-GHz Radio-over-Fiber Access Systems:** en este artículo se muestra experimentalmente la primera demostración de un sistema de radio sobre fibra de super banda ancha que transmite señales OFDM de 1 Gbps en portadoras de onda milimétrica de 40 GHz. Se logra más de 80 km vía Fibra Óptica Monomodo Estándar (*SSMF, Standard Single Mode Fiber*) sin compensación de dispersión con menos de 0,5 dB de pérdida de potencia [16]. Este artículo es de suma importancia para el desarrollo de este proyecto ya que se muestra la aplicación de *RoF*, con la diferencia de que en la propuesta se pretende usar *RoF* con una red *FTTH-GPON* para el soporte de servicios *Quad Play*.
- **Simple Multi-Gbps 60 GHz Radio-over-Fiber Links Employing Optical and Electrical Data Up-Conversion and Feed-Forward Equalization:** en este artículo se muestra que la conversión óptica es mejor que la conversión eléctrica en simples enlaces de radio sobre fibra de 60 GHz basados en Intensidad de Modulación con Detección Directa (*IMDD, Intensity-Modulation Direct-Detection*). Se prueba que la ecualización usada mejoró las prestaciones de ambos sistemas, permitiendo la transmisión libre de errores de 4 Gbps sobre 500 m de fibra monomodo [17]. Este artículo se constituye en una importante referencia con el fin de desarrollar exitosamente este proyecto, en el sentido de que ofrece una base de conocimiento sobre *RoF*.

1.5. APORTES.

- Soporte teórico-práctico del desempeño a nivel físico de un sistema *FTTH-GPON* para servicios *Quad Play* al integrar un módulo *RoF*.
- Un módulo de RF e integración del mismo a una herramienta de simulación con el fin de analizar el sistema *FTTH-GPON* para servicios *Quad Play*.
- Diagramas y modelo de simulación del sistema *FTTH-GPON* para servicios *Quad Play*.
- Archivos de simulación del sistema *FTTH-GPON* para servicios *Quad Play*.
- Documento con análisis de parámetros de desempeño a nivel físico de un sistema *FTTH-GPON* para servicios *Quad-Play* al integrar un módulo *RoF* con el fin de que los operadores de red puedan contar con una referencia a la hora de la implementación a nivel de laboratorio y escala real.

En resumen, se definió el planteamiento del problema, los objetivos, la justificación, el estado del arte y los aportes del presente trabajo de grado. A continuación, se procede con el capítulo dos, donde se describe el marco teórico y conceptual.

2. CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.

2.1. GENERALIDADES DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES ÓPTICOS.

A continuación se detallan las características generales de un sistema de comunicaciones de fibra óptica de acuerdo con [18]; En la actualidad un sistema de comunicaciones de fibra óptica está basado en la técnica de Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM).

2.1.1. Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM).

WDM consiste en la técnica de multiplexar dos o más longitudes de onda sobre una fibra usando portadoras en las distintas ventanas dentro del BW óptico disponible (1280 – 1620 nanómetros (nm)), como por ejemplo en la segunda ventana (1310 nm), en la tercera ventana (1550 nm), etc. Esta técnica permite usar eficientemente la capacidad que ofrece la fibra óptica, transmitiendo la información sobre múltiples longitudes de onda en una misma fibra [19].

Debido a que la amplificación óptica sólo está disponible en la banda de 1550 nm, los sistemas WDM actualmente están trabajando en esta banda (ya que ofrece una atenuación más baja: 0.2² decibeles por kilómetro (dB/Km), en comparación con otras); sin embargo, se debe tener en cuenta el efecto de la dispersión cromática presente en dicha banda, la cual afortunadamente se controla usando compensadores. Además, es preciso aclarar que dentro de la banda de 1550 nm existen varias bandas: la banda S (1460 -1530 nm), la banda C (1530 -1565 nm), y la banda L (1565 -1625 nm).

Lo más interesante de usar *WDM* es la posibilidad de manejar en cada canal o portadora óptica protocolos totalmente distintos (transparencia al protocolo), es decir una portadora podría transportar: Modo de Transferencia Asíncrono (*ATM*, *Asynchronous Transfer Mode*), Jerarquía Digital Plesiócrona (*PDH*, *Plesiochronous Digital Hierarchy*), IP, *SDH*, etc. [19].

El funcionamiento de *WDM* se ilustra mejor a través de la figura 2.1.

² En este documento no se utiliza separador de miles, solamente separador de decimales independiente del formato (coma o punto).

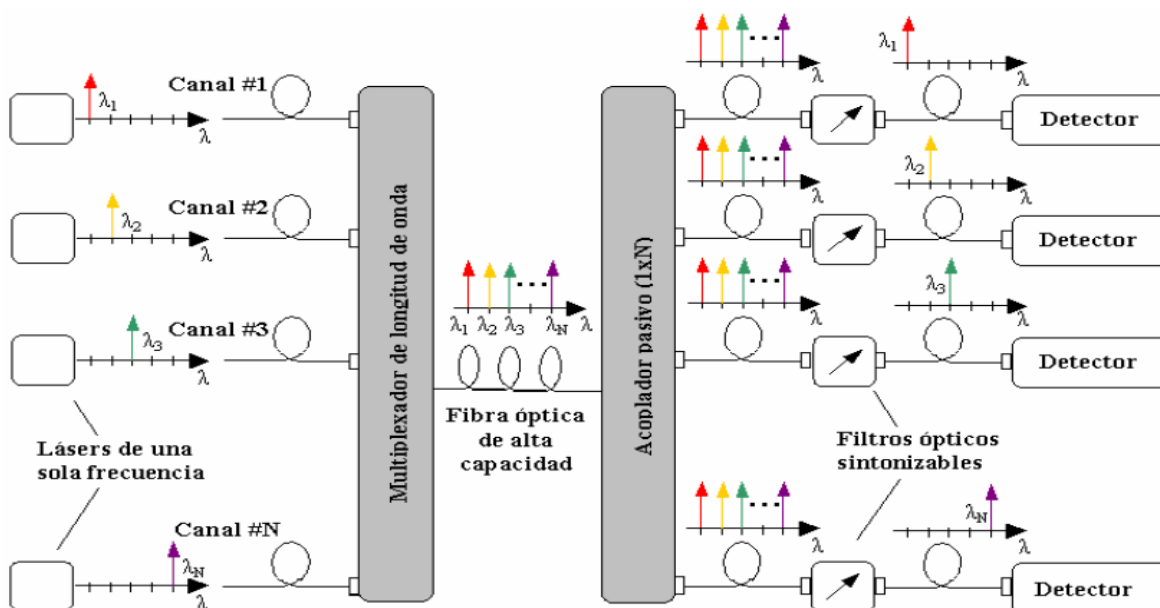


Figura 2.1 Esquema básico del funcionamiento de un sistema WDM. Para cada uno de los canales hay un láser emitiendo a diferente frecuencia. [18]

La mayoría del despliegue de WDM ha ocurrido en la forma de enlaces punto a punto con amplificadores entre ellos. Los canales WDM extremo a extremo (*lightpaths*) son estáticos. Una vez se establezcan dichos canales, ellos permanecen en su lugar. Cabe resaltar que hoy en día se desea hacer que los *lightpaths* sean más dinámicos, con el fin de aprovechar al máximo el BW de un canal cuando no curse tráfico por éste. Finalmente, se debe tener presente que los sistemas WDM pueden clasificarse tanto en sistemas CWDM como en sistemas DWDM [20].

2.1.1.1. Multiplexación por división de longitud de onda ampliamente espaciada (CWDM).

Los sistemas CWDM proporcionan máximo 18 longitudes de onda, definidas en el intervalo de 1270 nm a 1610 nm y poseen un espaciamiento en frecuencia correspondiente a 2.5 THz (20nm), por lo cual CWDM puede usar transmisores y filtros de menor precisión que DWDM. Sin embargo, las longitudes de onda están tan espaciadas que no se ajustan al BW del Amplificador de Fibra Dopada con Erbio (*EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier*) usado en estos sistemas, por lo tanto CWDM no aprovecha de manera eficiente el BW disponible en la fibra. Además, hoy en día entre los transmisores CWDM y DWDM solamente se aprecia una diferencia de costos significativa a velocidades de 1 Gigabit por segundo (Gbps), pero la diferencia no es tan considerable a 10 Gbps. Por consiguiente, CWDM es apropiado para bajas velocidades de transmisión de datos de datos, para redes de corto y mediano alcance (campus universitarios), para aplicaciones no amplificadas, y potencialmente se usa en la parte de red de acceso de un Proveedor de Servicio de Internet (*ISP, Internet Service Provider*) [20].

2.1.1.2. Multiplexación por división de longitud de onda densamente espaciada (DWDM)

La Unión Internacional de las Telecomunicaciones (*ITU, International Telecommunication Union*), considera “densamente espaciados” a los sistemas WDM con más de cuatro longitudes de onda y estandariza la separación de los canales aproximadamente a un mínimo de 100 GHz, que corresponde a 0.8 nm .

Las ventajas principales de DWDM son que las redes de fibra existentes pueden ser escaladas para soportar un mayor BW reemplazando simplemente los componentes terminales. Otra ventaja que brindan las redes ópticas basadas en esta tecnología, es la posibilidad de crear topologías virtuales de red en el dominio óptico, sobre una topología que siempre es dependiente de la instalación de la fibra óptica.

Los sistemas DWDM pueden proporcionar centenares de longitudes de onda espaciadas menos de 1 nm dentro del BW disponible del amplificador. Por tanto DWDM se usa en el núcleo de las redes metropolitanas y en las redes larga distancia [18] [20].

2.1.2. Esquema General del Canal Óptico (OCh)

La figura 2.2 hace referencia a la descripción general del canal óptico, destacándose las secciones que lo conforman: Sección de Multiplexación Óptica (OMS, *Optical Multiplex Section*), la cual se encarga del monitoreo y la gestión de un grupo de longitudes de onda, y Sección de Transmisión Óptica (OTS, *Optical Transmission Section*), que se encarga de monitorear los niveles de potencia, dispersión y pérdidas. Además, se puede apreciar cómo se conforma la trama que se transmite por el canal óptico, la cual incluye la carga útil y los encabezados que contienen la información acerca del tráfico transmitido en la Unidad de Carga Útil del canal Óptico (OPU, *Optical channel Payload Unit*), funciones de Operación, Administración y Gestión (OA&M, *Operation, Administration & Management*) a nivel del OCh - en la Unidad de Datos del canal Óptico (ODU, *Optical channel Data Unit*), y Monitoreo, detección y Corrección de Errores en Recepción (FEC, *Forward Error Correction*) - en la Unidad de Transporte del canal Óptico (OTU, *Optical channel Transport Unit*).

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

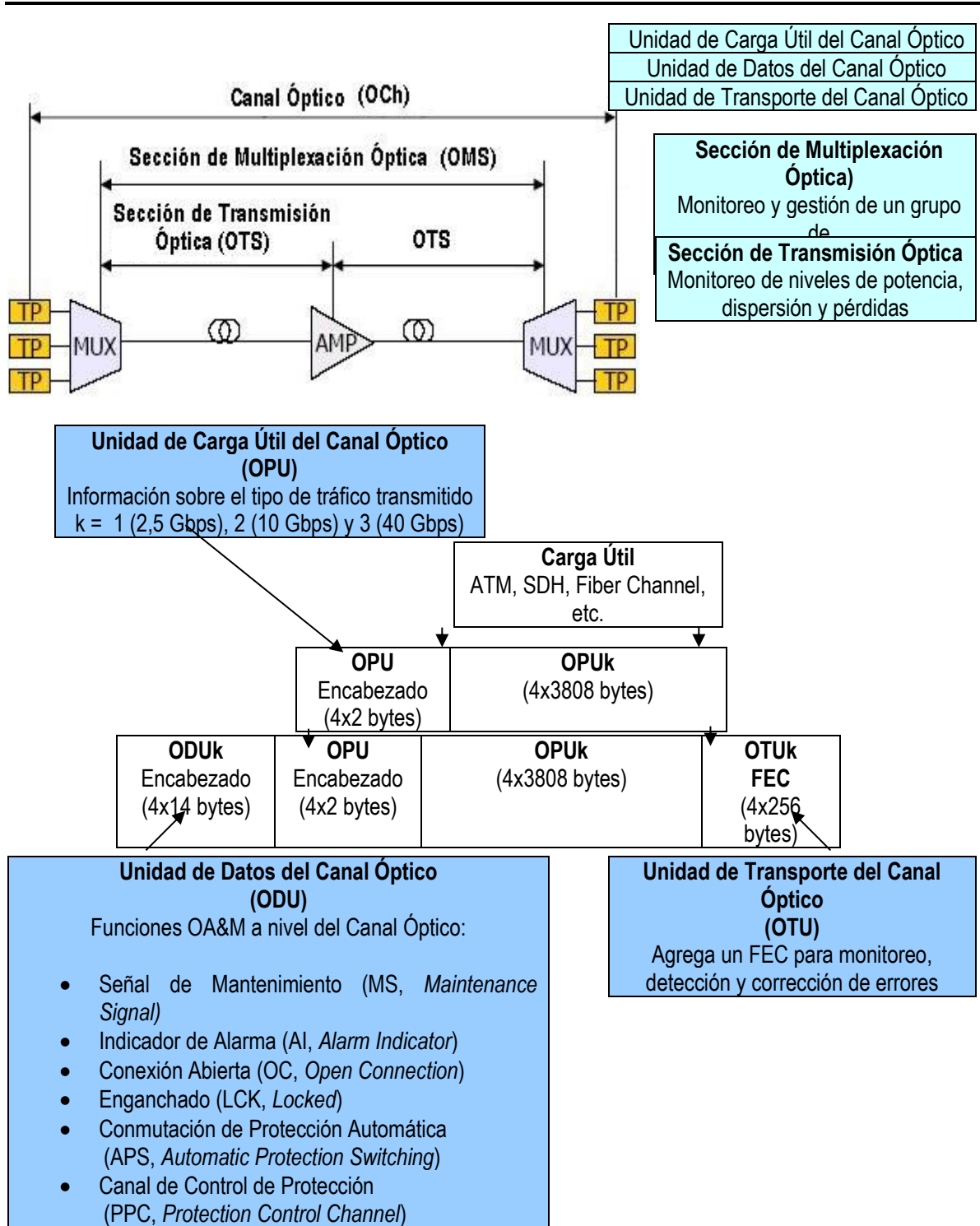


Figura 2.2 Esquema General del OCh [18].

➤ **Esquema básico del OCh**

La figura 2.3 muestra un esquema básico del OCh que se compone de un multiplexor, secciones de fibra, y por último de un demultiplexor. El esquema es básico porque no hay elementos ópticos como OADM u OXC.

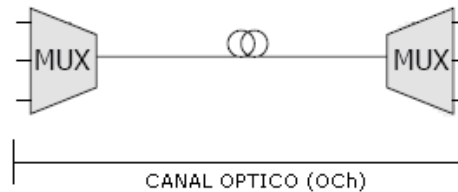


Figura 2.3 Esquema Básico del OCh.

➤ **Esquema del OCh con OADM**

A diferencia de la figura 2.3, la figura 2.4 contiene dos elementos ópticos adicionales: un OADM que brinda flexibilidad al enlace y un amplificador óptico. Opcionalmente, con el fin de que dicho OCh sea completamente transparente puede utilizarse un OXC.

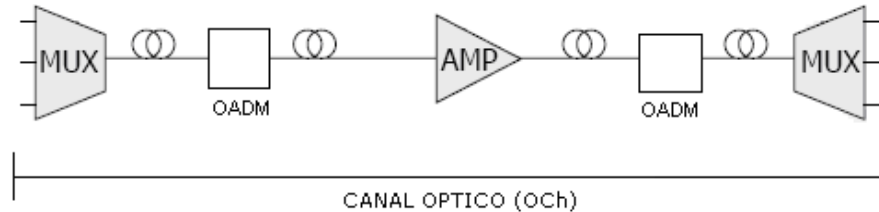


Figura 2.4 Esquema del OCh con OADM.

A continuación se detallan los tipos de interconexión de redes y la descripción de los equipos ópticos de la tecnología DWDM aplicada a las redes backbone de la multinacional Huawei Technologies, que se constituye en una referencia para la definición de la red metropolitana WDM característica [18].

2.1.3. Tipos de Interconexión de Redes Ópticas

2.1.3.1. Red punto a punto

Está compuesta de un Multiplexor Terminal Óptico (OTM, *Optical Terminal Multiplexer*) y un Amplificador de Línea Óptico (OLA, *Optical Line Amplifier*), y es el modo de interconexión más utilizado por los equipos de Huawei (OptiX Metro 6100), como se puede apreciar en la figura 2.5 [21].

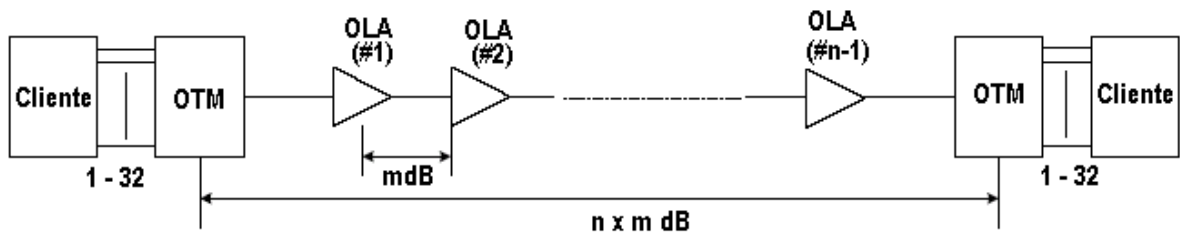


Figura 2.5 Red Punto a Punto [18].

2.1.3.2. Red en cadena

Esta red se usa comúnmente en redes backbone DWDM de gran capacidad y larga distancia. Además, se considera como una extensión de la red punto a punto incluyendo elementos adicionales como: OADM, Ecuador Óptico (OEQ, *Optical Equalizer*) y Regenerador (REG, *Regenerator*), como se muestra en la figura 2.6 [21].

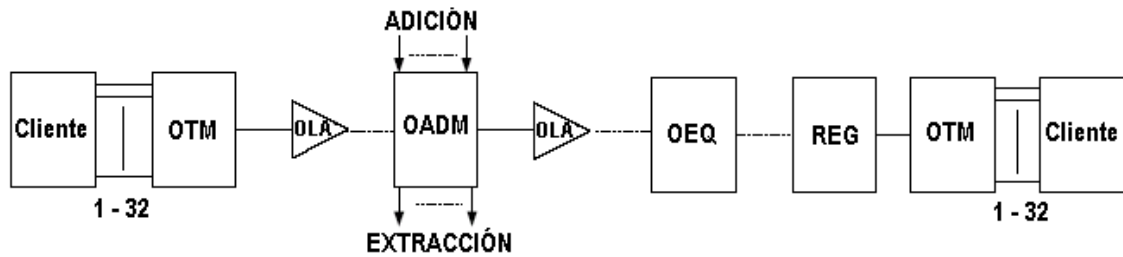


Figura 2.6 Red en Cadena [18].

2.1.3.3. Red en anillo

Esta red se utiliza ampliamente en redes regionales y se compone de OADM y OTM espalda con espalda (back to back), para eliminar el ruido acumulado por causa de los amplificadores, según la figura 2.7 [21].

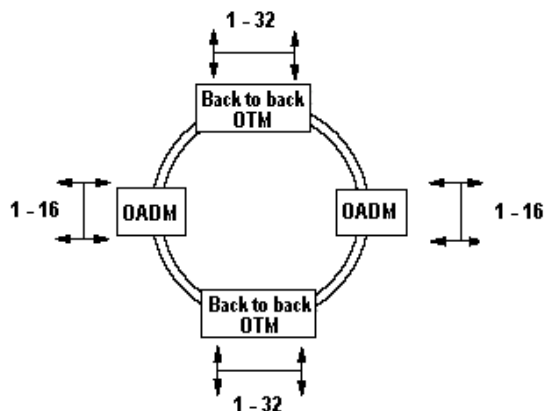


Figura 2.7 Red en Anillo [18].

2.2. FUNDAMENTOS PARA EL MONITOREO DEL CANAL ÓPTICO BASADO EN OPM

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”. Sin embargo, es preciso aclarar que de acuerdo con la recomendación ITU-T G.697 [22], tales parámetros se clasifican en dos categorías: Degradaciones Ópticas y Parámetros de Monitoreo Óptico. Entre las degradaciones ópticas se encuentran: dispersión cromática, PMD, diafonía, atenuación, jitter, entre otros; mientras que dentro de los parámetros de monitoreo (supervisión) óptico están: longitud de onda de cada canal, relación señal a ruido óptica (OSNR), potencia por canal DWDM, potencia total en la fibra, y factor Q (estrechamente ligado a la BER).

El modelo de referencia OPM indica el camino apropiado para efectuar un correcto monitoreo del canal óptico. Además, como se trata de un monitoreo transparente (totalmente óptico) por el hecho de estar basado en OPM, es importante decir que los parámetros: OSNR, longitud de onda de cada canal, potencia por canal DWDM, y potencia total en la fibra, conciernen a las *características analógicas* de la señal óptica y no a las *digitales*, como: BER, factor Q, jitter o dispersión, las cuales no pueden ser monitoreadas usando OPM convencional [18]; sin embargo, si pueden monitorearse a través de OPM avanzado.

2.2.1. Consideraciones en cuanto al desempeño de los sistemas DWDM.

Los factores críticos que limitan el desempeño de los sistemas DWDM se muestran en la figura 2.8. Existen tres categorías, dentro de las cuales se encuentran divididos tales factores: *potencia, longitud de onda y tiempo*. Es importante recalcar que es posible que se originen otros factores de igual importancia debido a la combinación de dichas categorías [18].

En el eje de la potencia se pueden encontrar elementos como: potencia del láser, atenuación de la fibra, y pérdidas de los componentes; en el eje de la longitud de onda se localizan elementos como: estabilidad espectral, rango espectral de los EDFA, longitud de onda central y BW; y en el eje del tiempo se tienen elementos como: dispersión de la fibra, jitter de la señal y tasa de transmisión de datos. En la intersección entre el eje de la potencia y el de la longitud de onda se encuentran: Emisión Espontánea Amplificada (ASE, *Amplified Spontaneous Emission*) del EDFA, ganancia de los EDFA, la interferencia entre canales (diafonía) y FWM; en la esquina entre el eje de la longitud de onda y el del tiempo aparecen: inestabilidad del láser, dispersión cromática, estabilidad de la frecuencia óptica y ruido de fase por la modulación; por último, en la intersección entre el eje del tiempo y el de la potencia se encuentran: profundidad de la modulación del láser, falta de linealidad de la fibra y de los componentes, Ruido de Intensidad Relativa (RIN, *Relative Intensitive Noise*) y BER [23].

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

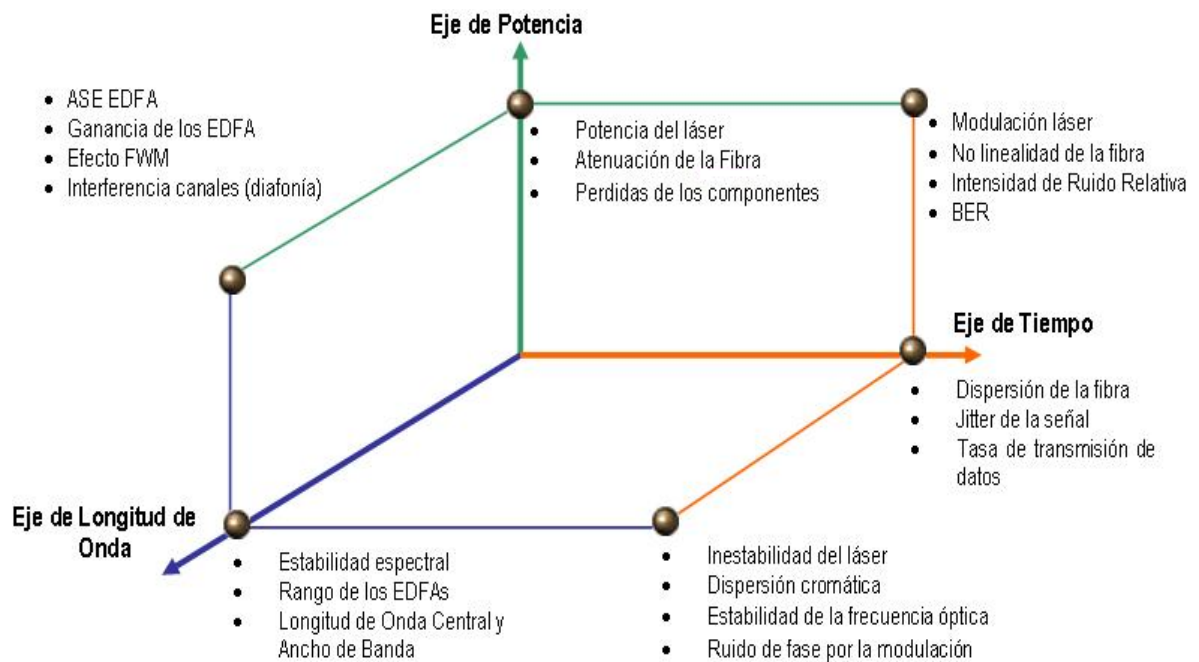


Figura 2.8 Dimensionamiento de Factores Críticos en Sistemas DWDM [18].

2.2.2. DEGRADACIONES ÓPTICAS Y PARÁMETROS DE MONITOREO ÓPTICO

Los tres efectos importantes que se presentan en la fibra óptica, que afectan la transmisión de las señales limitando su desempeño, y que se consideran como algunos de los parámetros que degradan la calidad de la señal óptica, son [23]:

- *Atenuación*: pérdida de la potencia de la luz o decaimiento de la fuerza de la señal, 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 de la luz con el material por el cual ésta viaja, resultando en cambios en la onda de luz e interacciones entre ondas de luz.

Cada uno de estos efectos tiene varias causas, y no todas afectan a DWDM. Más adelante se discuten aquellas causas relevantes para DWDM.

Como se aprecia en la figura 2.9 las fuentes de deterioro de la calidad de transmisión en DWDM se agrupan en dos categorías:

- *Lineal*. Aquí se encuentran la pérdida por atenuación y los efectos de dispersión (cromática y PMD).
- *No Lineal*. Aquí se destacan los efectos paramétricos entre los cuales están: Automodulación de Fase (SPM, *Self Phase Modulation*), Modulación de Fase Cruzada (XPM, *Cross Phase Modulation*), y FWM; y los Efectos de difusión que son: Difusión Estimulada de Brillouin (SBS, *Stimulated Brillouin Scattering*), y Difusión Estimulada de Raman (SRS, *Stimulated Raman Scattering*).

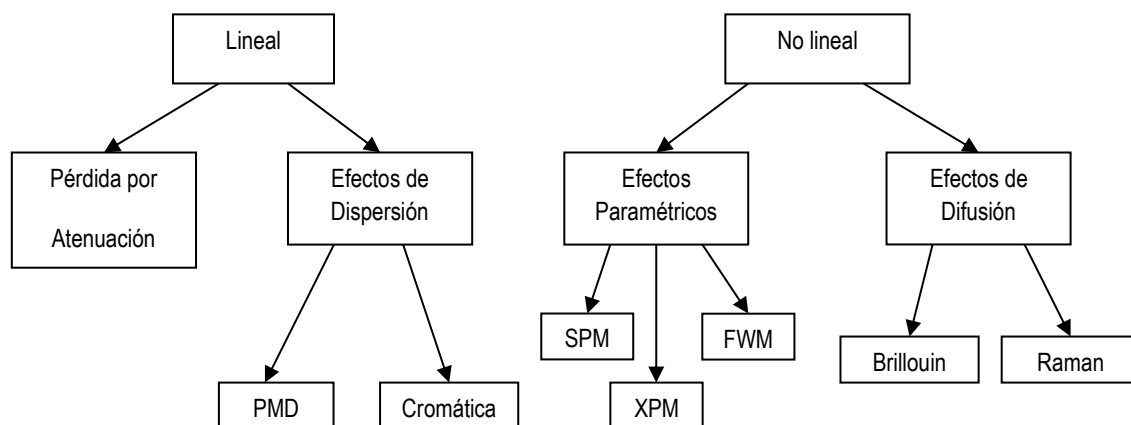


Figura 2.9 Fuentes de deterioro de la calidad de transmisión en DWDM [13].

La importancia del monitoreo óptico es progresiva ya que mantiene un alto grado de confiabilidad del equipo, junto con la posibilidad de localizar y reparar problemas de red, y diagnosticar eficazmente fallas y degradaciones. Asimismo, el monitoreo óptico es un proceso activo que puede ayudar a gestionar los SLA y reducir los costos operacionales, a expensas de un aumento en los costos de los equipos, tornándose más interesante a medida que aumenta la complejidad de la red. Por consiguiente, el monitoreo es un elemento fundamental en la gestión de redes ópticas.

➤ Degradaciones ópticas.

Según [22], a continuación, se clasifican y enumeran las principales degradaciones de los sistemas en la capa óptica que limitan la capacidad del sistema para transportar información. En la tabla 2.1 se muestra una lista de las principales posibles degradaciones de sistema.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

Tabla 2-1 Degradaciones Ópticas. [Fuente: Rec. ITU-T G.697].

Variación de la Degradación	Frecuencia de Ocurrencia Relativa	Descripción
Atenuación	Elevada	
Variaciones de la Potencia del Canal Óptico debido a Variaciones de Ganancia	Elevada	
Desviación de la Frecuencia (o Longitud de Onda) del Valor Nominal	Elevada	Rec. ITU-T G.692
Dispersión por Modo de Polarización (PMD) (primer orden y órdenes superiores)	Media	Apéndice II/G.663
Mezcla de Cuatro Ondas (FWM)	Media	Apéndice II/G.663
Ruido de Emisión Espontánea Amplificada (ASE) en Amplificación Óptica	Media	Apéndice II/G.663
Dispersión Cromática	Media	Apéndice II/G.663
Pendiente de Dispersión Cromática	Media	Recs. ITU-T G.652, G.653, G.655
Reflexiones	Media	Apéndice III/G.663
Ruido de Láser	Media	
Diafonía entre Canales	Media	Sup. ITU-T 39
Diafonía Interferométrica	Media	Sup. ITU-T 39
Modulación de Fase Cruzada (XPM)	Baja	Apéndice II/G.663
Automodulación de Fase (SPM)	Baja	Apéndice II/G.663
Difusión Estimulada de Brillouin (SBS)	Baja	Apéndice II/G.650.2, Apéndice II/G.663
Difusión Estimulada de Raman (SRS)	Baja	Apéndice II/G.663

Se debe tener en cuenta que todas las anteriores degradaciones pueden ser suficientemente fuertes para producir una degradación profunda en una señal óptica hasta un nivel en que el receptor ya no puede detectar los datos con una tasa de error razonable.

Los niveles de frecuencia de ocurrencia relativa en la tabla 2.1 son:

- *Baja*: cuando la probabilidad que el efecto sea suficientemente fuerte como para causar una penalidad de X dB, se produzca a razón de un evento en 10 años aproximadamente.
- *Media*: cuando la probabilidad que el efecto sea suficientemente fuerte como para causar una penalidad de X dB, se produzca a razón de un evento por año aproximadamente.
- *Alta*: cuando la probabilidad que el efecto sea suficientemente fuerte como para causar una penalidad de X dB, se produzca a razón de 10 eventos por año aprox.

Hay que tener en cuenta que un evento podría causar una penalidad de X dB en un canal óptico simple o en un sistema multicanal³.

³ Un operador, teniendo en cuenta una red DWDM de 10000 Km sugiere definir un valor X de penalidad de 3 dB como el valor que corresponde a una degradación significativa.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

Por último, como se mencionó anteriormente, en este trabajo de grado se abordan de forma exclusiva las siguientes degradaciones: dispersión (cromática y PMD), diafonía (entre canales e intracanal) y atenuación.

➤ **Parámetros de monitoreo óptico [14]**

Los parámetros ópticos que se pueden medir utilizando la tecnología actual en sistemas de transmisión óptica según [22], esto son:

- Longitud de onda de canal.
- Potencia de canal.
- Potencia total.
- Factor Q.
- OSNR cuando no está presente una conformación de ruido significativa.

Asimismo, como ya se dijo previamente, en este trabajo de grado sólo se tratan los siguientes parámetros de monitoreo: longitud de onda de canal, OSNR, potencia por canal DWDM, y potencia total en la fibra.

➤ **Correlación entre algunas degradaciones ópticas y parámetros de monitoreo óptico**

De acuerdo a la tabla 2.2, se puede concluir que todas las degradaciones ópticas señaladas, tienen una correlación directa con los parámetros de monitoreo: *potencia de canal*, *OSNR*, y *factor Q*, indicando que dichos parámetros son de especial importancia para un buen desempeño de la red, teniendo en cuenta que en este contexto, para el desarrollo de este trabajo de grado, se van a trabajar con mayor énfasis los parámetros: *OSNR* y *Factor Q (BER)*.

Tabla 2-2 Correlación entre las Degradaciones de Elevada Frecuencia de Ocurrencia y los Parámetros de Monitoreo [14].

PARÁMETROS / DEGRADACIONES	Potencia Total	Potencia del Canal	Longitud de Onda del Canal	OSNR	Factor Q
Variación de Atenuación	X	X		X	X
Desviación de Frecuencia (o Longitud de Onda del Valor Nominal)		X	X	X	X
variaciones de la potencia del canal óptico debido a variaciones de ganancia		X		X	X

Es necesario aclarar que tanto la variación de atenuación como las variaciones de potencia del canal óptico debido a variaciones de ganancia, se encuentran todavía en estudio. Por el contrario, como se puede apreciar

en la tabla 2.2., existe una correspondencia directa entre la desviación de frecuencia del valor nominal y la longitud de onda de canal ya que la exactitud de medición requerida para la longitud de onda de canal depende de la desviación de frecuencia central máxima para el canal [22].

Tabla 2-3 Degradaciones Ópticas y Parámetros de Monitoreo Óptico [14].

DEGRADACIONES ÓPTICAS	PARÁMETROS DE MONITOREO ÓPTICO
1. Dispersión Cromática.	1. Longitud de onda de cada canal.
2. PMD.	2. BER (factor Q).
3. Atenuación.	3. OSNR.
4. Diafonía.	4. Potencia por canal DWDM.

La tabla 2.3 muestra el orden de prioridad de las degradaciones ópticas (a excepción de la diafonía) y el orden de prioridad de los parámetros de monitoreo óptico. Para las degradaciones, si se presenta cualquier tipo de dispersión, se produce Interferencia entre Símbolos (ISI, *InterSymbol Interference*) y finalmente la atenuación es el reflejo de las degradaciones sufridas a lo largo de la transmisión. Paralelamente es posible que se produzca diafonía (interferencia entre canales) debido a la posible variación de las frecuencias centrales y a la multiplexación y demultiplexación anómala. Por otra parte, para los parámetros de monitoreo óptico, la longitud de onda de cada canal es indispensable ya que sin ella no sería posible transportar información. Una vez haya sido asignada una longitud de onda, la BER (factor Q) junto con la OSNR se convierten en parámetros importantes que brindan información relevante en cuanto a la calidad de la señal óptica (desempeño del sistema), y finalmente la potencia por canal DWDM se constituye en un parámetro de monitoreo relevante para obtener información adicional del canal.

2.2.3. Técnicas OPM.

En los sistemas terrestres WDM, particularmente con el uso de los OADM, ha habido interés en las medidas del espectro óptico para gestionar la reconfiguración y el descubrimiento de canales. Las técnicas basadas en tonos fueron las primeras que se usaron para el monitoreo de canales ópticos. El OPM avanzado o el monitoreo de la calidad de la señal, que mide la SNR por canal, ha sido adoptado en los laboratorios como una técnica de monitoreo de nueva generación [24].

A continuación, se listan las medidas de nivel físico para OPM, que se pueden realizar en una señal óptica [24]:

- Potencia promedio (por longitud de onda o agregado).
- Potencia pico.
- Forma del pulso/bit.
- Diagrama del ojo.
- Auto correlación de la intensidad/campo (incluyendo el orden más alto).

- Espectro de amplitud de Potencia (espectro de RF).
- Estado de la Polarización.
- Espectro Óptico (longitud de onda).
- Histograma de Amplitud (síncrono y asíncrono).
- Curva V (Factor Q)/BER.
- PMD (incluyendo el orden más alto).
- Dispersión Cromática.
- Características de la portadora de Fase/Óptica.

Es importante tener presente que OPM está aun altamente restringido por la tecnología disponible para el monitoreo óptico de las características digitales de la señal óptica. Al mismo tiempo, OPM está llegando a ser mucho más común en los sistemas WDM y puede ser muy bien adaptado para estandarización.

Por otra parte, los parámetros frecuentemente sugeridos para OPM se indican en la tabla 2.4, donde se muestra una clasificación entre los parámetros de la capa OCM/WDM y los parámetros avanzados y de calidad de la señal, con el fin de comprender la distribución de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica con respecto a las capas del modelo de referencia OPM.

Hay que resaltar que los monitores en los elementos de red pueden ser leídos por el software de gestión de la red, a través de un canal óptico de supervisión.

Tabla 2-4 Parámetros OPM Sugeridos [24].

Parámetros del Nivel OCM/WDM	Parámetros Avanzados y de Calidad de la Señal
Potencia Agregada	OSNR dentro de Banda
Potencia del Canal	Factor Q / BER / OSNR
Longitud de Onda del Canal	PMD
OSNR Espectral	Dispersión Cromática Acumulada
	Velocidad de transmisión de datos
	Jitter

2.3. PRINCIPIOS DE OFDM.

En concordancia con lo expuesto en [25], [26], [27], la técnica de modulación OFDM (Modulación por División de Frecuencia Ortogonal, *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) se utiliza actualmente en numerosas tecnologías dentro del contexto de las telecomunicaciones.

Es muy importante mencionar que entre los estándares que ya aplican este tipo de modulación, se pueden destacar:

- ❖ Evolución a Largo Plazo (LTE, *Long Term Evolution*) que se refiere a las telecomunicaciones móviles de cuarta generación (4G).
- ❖ Televisión digital terrestre en la norma europea DVB-T (*Digital Video Broadcasting-Terrestrial*) y estándares aprobados en otros países como DVB-H (*DVB Handheld*), DVB-SH (*DVB Satellite services to Handhelds*), DVB-T2 (*DVB Second Generation Terrestrial*).
- ❖ Transmisión de datos a través de la tecnología WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwaves Access*).
- ❖ Estándar IEEE 802.11 para redes WLAN (Redes de Área Local Inalámbricas, *Wireless Local Area Networks*).
- ❖ Acceso a internet de banda ancha (ADSL *Asymmetric Digital Subscriber Line*).

OFDM es un gran avance para las comunicaciones digitales de banda ancha, tanto para guías ópticas o metálicas (en lugar de OFDM se suele usar el término DMT, *Discrete Multi-tone*) como para medios inalámbricos, ya que permite la transmisión de altas tasas binarias en canales de carácter hostil. Entre todas las ventajas que puede proporcionar esta modulación, se puede destacar principalmente la robustez que presenta ante los problemas que produce la propagación multitrayecto, un uso bastante más eficiente del espectro, la sencillez que mantiene realizar la modulación y demodulación mediante IFFT y FFT (*Inverse Fast Fourier Transform* y *Fast Fourier Transform*), la flexibilidad para poder adaptarse a sistemas de gran ancho de banda gracias a la ecualización en el dominio de la frecuencia, compatibilidad con técnicas MIMO (*Multiple-input Multiple-output*), además de la inserción de un prefijo cíclico (CP, *Cyclic Prefix*) que provoca la eliminación de los efectos producidos por las interferencias intersimbólicas (ISI, *Intersymbol Interference*).

Como principio primordial de OFDM está la división del espectro disponible en varios subcanales donde la información esta modulada en múltiples portadoras, cada una a distinta frecuencia como establece la técnica FDM (*Frequency-Division Multiplexing*) pero con la diferencia de que las portadoras son ortogonales entre sí. En seguida se va a profundizar en los detalles técnicos y en los bloques que componen un sistema OFDM tras una introducción histórica a la evolución de esta técnica de modulación [25].

2.3.1. Modulaciones multiportadora OFDM.

El principio fundamental de las modulaciones multiportadora es dividir un canal de banda ancha en canales de banda estrecha ortogonales, a los que se les denomina generalmente subportadoras, de forma que el flujo de bits a transmitir se reparte entre dichos canales de banda estrecha. Como consecuencia de la ortogonalidad entre las subportadoras, el canal de banda ancha es equivalente a múltiples canales paralelos de banda estrecha. El número de subportadoras se elige de manera que experimenten desvanecimiento plano en frecuencia, que se consigue si el ancho de banda de cada subportadora es lo suficientemente pequeño con respecto al ancho de banda de coherencia del canal.

Esto produce la principal ventaja de las modulaciones multiportadora que es la robustez frente a la ISI que aparece en las comunicaciones de banda ancha con multitrayecto, de acuerdo a lo que se muestra en la figura 2.10.



Figura 2.10 Canal multitrayecto en OFDM [26].

Por lo anterior, es pertinente considerar siempre la propagación multitrayecto en OFDM donde la señal recibida es la suma de varias versiones de la señal transmitida con retardo variable y atenuación.

En sistemas inalámbricos con dispersión de retardo apreciable, los esquemas multiportadora eliminan la ISI de forma sencilla, mientras que para los esquemas monoportadora es necesaria una ecualización adicional que requiere un filtrado con un elevado número de etapas y, por tanto, ecualizadores de alta complejidad. Además, es difícil conseguir que los coeficientes asociados a las etapas del ecualizador sean totalmente exactos cuando el canal cambia de forma rápida [26] [27].

2.3.2. Fundamentos básicos de OFDM

La multiplexación por división en frecuencias ortogonales OFDM es una técnica de modulación multiportadora que ha sido adoptada como esquema de modulación para sistemas de comunicaciones inalámbricas por su buena respuesta ante canales de carácter hostil.

OFDM no solo se aplica en sistemas inalámbricos, de hecho, se suele emplear el término DMT (*Discrete MultiTone*) para sistemas con medios de transmisión guiados, como cable coaxial o par de cobre. El motivo de la diferenciación entre DMT y OFDM se produce debido a que en sus inicios las modulaciones multiportadora por medios guiados utilizaban modulación adaptativa en cada subportadora, sin embargo, en OFDM todas las subportadoras estaban moduladas de la misma manera. No obstante, se ha generalizado el uso de la modulación adaptativa en OFDM de tal forma que esta diferenciación tiene sentido únicamente en términos históricos.

Propagación multiportadoras OFDM

Es importante responder la siguiente inquietud: ¿cómo incrementar el periodo de los símbolos? La respuesta considera transmitir los datos serie en diferentes portadoras, pasando de serie a paralelo, así se incrementa el periodo de los símbolos, como se puede apreciar en la figura 2.11.

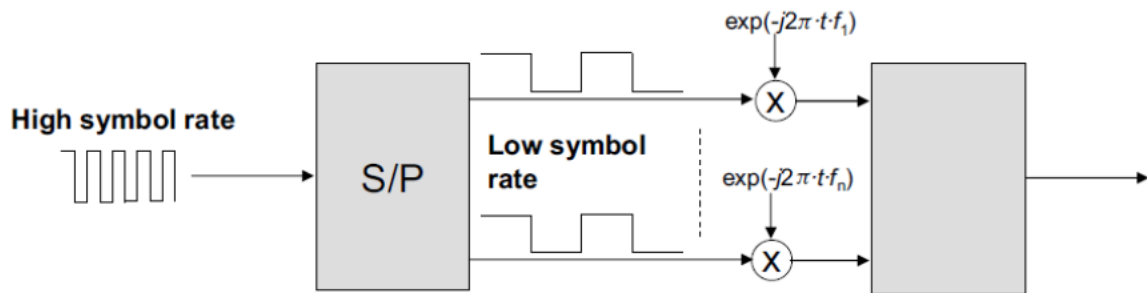


Figura 2.11 Transmisión en OFDM [26].

Ortogonalidad OFDM

A continuación, se mencionan aspectos importantes para tomar en cuenta dentro del contexto de ortogonalidad en OFDM:

- ❖ Las subportadoras se pueden traslapar.
- ❖ Los picos de las subportadoras anulan las siguientes.
- ❖ Si los picos no se anulan las ondas no son ortogonales, aparece interferencia inter-portadora (*ICI*, *Inter-Carrier Interference*).

Subportadoras OFDM

Las subportadoras en OFDM deben estar espaciadas bandas de frecuencias de tamaño $1/T_s$, en concordancia con las figuras 2.12(a) y 2.12(b).

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

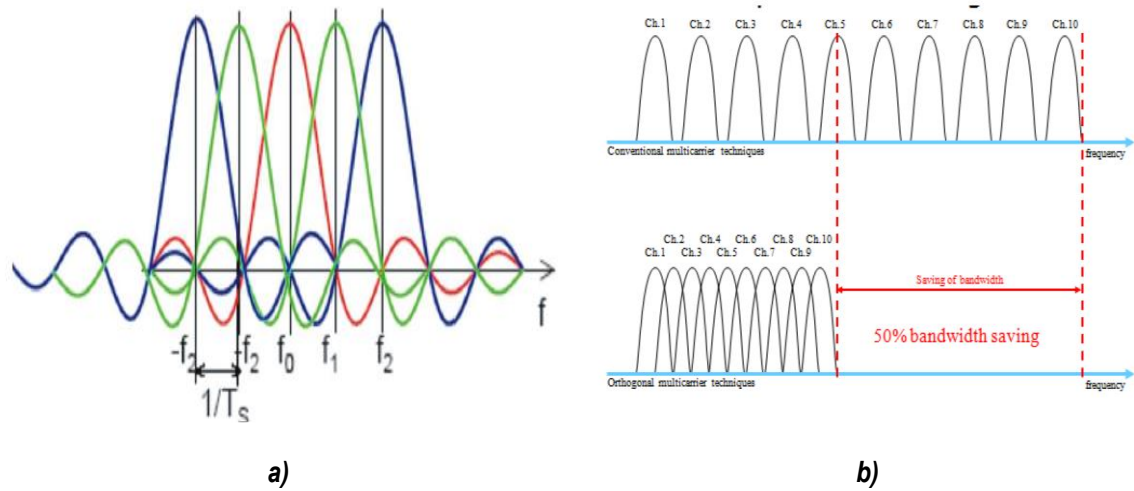


Figura 2.12 a) Interespaciado de subportadoras en OFDM. b) Detalle del espaciamiento entre subportadoras en OFDM [26] [27].

La diferencia entre subportadoras adyacentes debe ser igual al inverso del periodo de símbolo para cumplir la condición de ortogonalidad, tal y como se muestra en la ecuación 2.1.

$$(f_m - f_k) = Bw = 1/T_s \quad (2.1)$$

El espaciamiento entre subportadoras normalmente es de 15KHz, donde como ejemplo se ilustra en la figura 2.13.

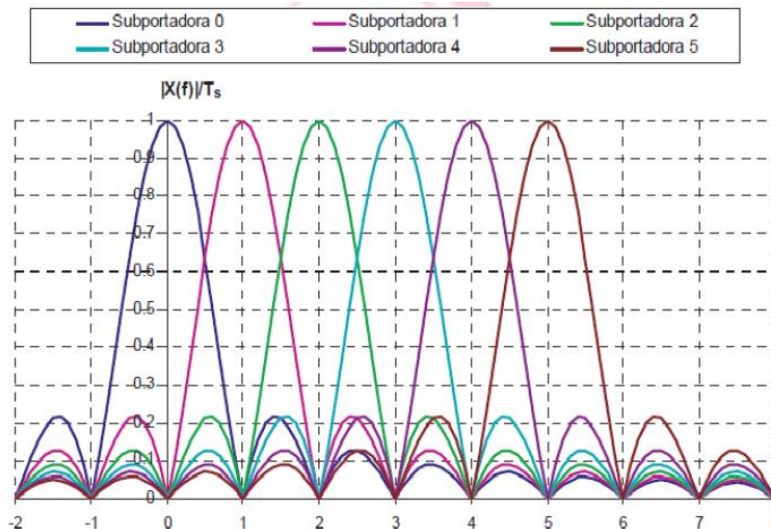


Figura 2.13 Espaciamiento de 15Khz entre subportadoras de OFDM [27].

2.3.2.1. Transmisor OFDM

Según lo expuesto en [26] [27], entre las características sobresalientes están:

- ❖ La señal a ser transmitida se define en el dominio de la frecuencia.
- ❖ Conversor serie a paralelo: convierte los símbolos seriales en bloques de datos de longitud M .
- ❖ Una señal OFDM consiste en la suma de subportadoras, cada una de las cuales se modula por un símbolo QPSK, 16QAM o 64QAM, denotado como lo muestra la figura 2.14 del transmisor y la figura de símbolos:

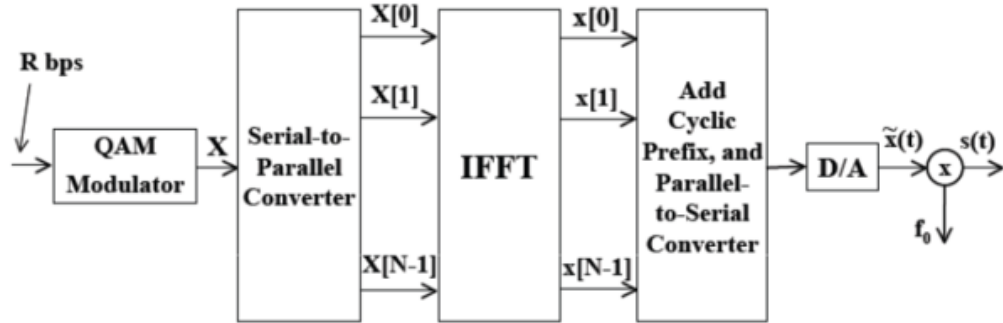


Figura 2.14 Transmisor OFDM [28].

También se destaca la transformada inversa de Fourier en tiempo discreto (IFFT), como se muestran en las ecuaciones 2.2 y 2.3

$$s(n) = \sum_{k=0}^{N-1} d_k e^{j\frac{2\pi kn}{N}} = \sum_{k=0}^{N-1} s(k) e^{j\frac{2\pi kn}{N}} ; n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.2)$$

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y(k) e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (2.3)$$

Donde $\mathbf{S}(n)$ es la transformada inversa de Fourier en tiempo discreto, sin el factor multiplicativo. Las muestras en el tiempo del símbolo OFDM, $\mathbf{s}(n)$ corresponden con la transformada inversa de Fourier de la secuencia $\mathbf{S}(k)$, que contiene en las K primeras muestras los símbolos a modular y ceros en las $N-K$ restantes, como se observa en la figura 2.15.

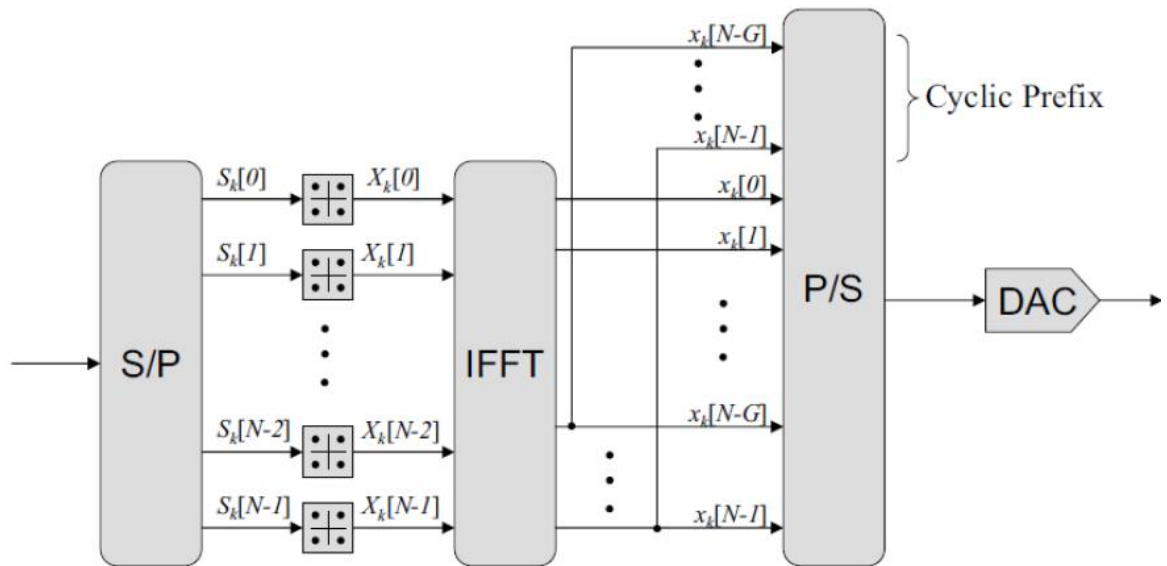
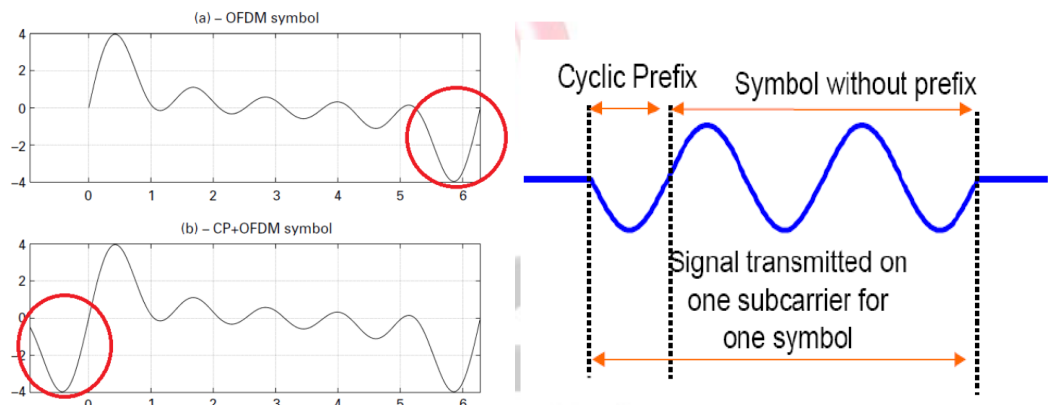


Figura 2.15 15 IFFT en OFDM [28].

De la figura 2.15 se deben tener presente las siguientes características:

- ❖ Se pueden obtener diferentes ganancias por cada subportadora.
- ❖ Cada subportadora puede tener una velocidad diferente.
- ❖ Vector X_k pasa a través de un módulo IFFT, por lo tanto N muestras complejas en el dominio del tiempo.

El símbolo OFDM aparece como periódico debido a la inserción del CP, como se puede observar en la figura 2.16.



Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

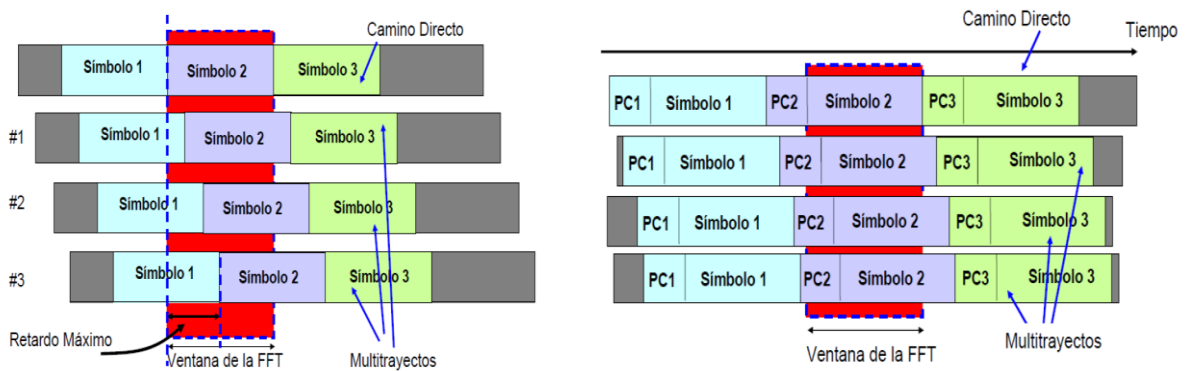


Figura 2.16 El símbolo OFDM aparece como periódico debido a la inserción del CP.

De la figura 2.16 se puede destacar los siguientes aspectos:

- ❖ Efecto del canal: multiplicación por un escalar.
- ❖ Permite el uso de la DFT y la IDFT
- ❖ En el caso de LTE N_c es 600 en un BW de 10 MHz, IFFT puede ser N 1024. $F_s = 15.36$ MHz.
- ❖ El tamaño de la IFFT no es una norma en ninguna especificación radio.
- ❖ Si el número de subportadoras procesadas es mayor que el de subportadoras moduladas, las subportadoras no moduladas se llenan con ceros.

2.3.2.2. Receptor de OFDM.

Se deben tener en cuenta las siguientes acciones:

- ❖ Nuevamente se convierte la señal de serial a paralelo.
- ❖ Considerando que existe sincronización en tiempo y frecuencia, las muestras correspondientes a la longitud del CP se remueven.
- ❖ Estimación de canal mediante el uso de portadoras piloto.
- ❖ Se aplica la FFT.

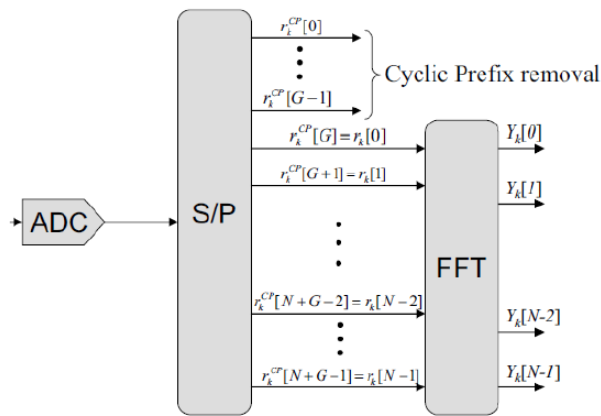


Figura 2.17 Receptor OFDM [28].

El proceso de demodulación, se realiza a partir de la DFT, obteniéndose N muestras en frecuencia de la señal OFDM, siendo las K primeras los símbolos d_k transmitidos, tal cual lo corrobora la formula y figura 18.

$$s(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} ; k = 0, 1, \dots, N-1$$

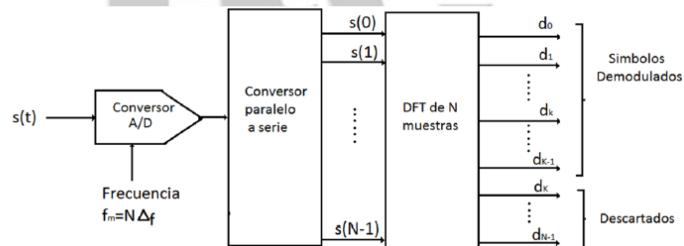


Figura 2.18 Proceso de demodulación OFDM [28].

Cabe resaltar que con el fin de mantener la ortogonalidad, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- El espacio entre subportadoras, considere T_s como la duración del símbolo: $1/T_s = B_w$
- Empleando una IFFT de N puntos (N valor de $2k$), frecuencia de muestreo de la señal: $F_s = NB_w$
- Duración del símbolo después de adicionar CP: $T_s + T_{cp}$
- Ancho de banda de la señal OFDM: $B = N_c B_w$.

2.4. SISTEMAS RoF.

En la actualidad, los usuarios finales demandan una conexión inalámbrica permanente desde sus dispositivos móviles a una alta velocidad de transmisión de datos, sin necesidad de dirigirse a puntos de acceso cableados. Sin embargo, los servicios inalámbricos no poseen suficiente ancho de banda para proveer altas capacidades de transmisión. Actualmente, las redes Ethernet (*GbE*) suministran hasta 1 Gb para sistemas inalámbricos, y se espera muy pronto la implementación de 10 GbE [29]. Para las transmisiones a velocidades de multiGbps, se estudian los posibles escenarios de implementación de sistemas inalámbricos operando a frecuencias portadoras extremadamente altas (*EHF*, *Extremely High Frequency*), cuyo rango oscila entre 30 y 300 GHz. Este rango de frecuencias es conocido como la banda de ondas milimétricas (*MMW*, *Millimeter Wave*), que dispone de más ancho de banda en el rango de los GHz. El ancho de banda de los sistemas inalámbricos que operan alrededor de los 60 GHz están siendo estudiados; por ejemplo, en el grupo IEEE 802.15.3c. Se enfocan en distancias de transmisión de rango corto de hasta 10 m y se proponen sistemas inalámbricos internos en el rango de las MMW para la provisión de velocidades mayores que 1 Gbps [30].

Para el desarrollo de sistemas que trabajen en bandas de MMW se presentan problemas, como, por ejemplo, el costo de los equipos electrónicos utilizados y el aumento de las Estaciones Base (*BS*, *Base Station*) que deberían implementarse. Además, la transmisión de señales de MMW necesita mayor potencia, debido a las altas pérdidas en el medio inalámbrico, lo cual genera inconvenientes en la implementación. Algunos de estos inconvenientes son solucionados con la tecnología de radio sobre fibra (*RoF*, *Radio-over-Fiber*), la cual es una de las soluciones más prometedoras para las redes de acceso. Las ventajas de usar la fibra óptica como medio para transmitir señales de MMW consiste en su inmunidad a las interferencias electromagnéticas, la gran capacidad de transmisión, pérdidas en la propagación entre los 0,2-0,5 dB/km, dependiendo del tipo de fibra utilizada, y la longitud de onda de operación, siendo estos valores muy bajos con respecto al cobre y el aire [4]. Por otra parte, los sistemas RoF que operan en la banda MMW requieren de células pequeñas debido a la corta distancia de propagación, de hecho, los enlaces de radio de MMW están siendo considerados para la implementación de sistemas micro o pico celulares de banda ancha, redes de acceso y redes inalámbricas internas [5].

La convergencia de las comunicaciones inalámbricas y los sistemas de fibra óptica se han convertido en una técnica prometedora para proveer servicios de acceso inalámbrico de banda ancha, en un rango de aplicaciones que incluyen soluciones en redes de acceso, en extensión de la cobertura y de la capacidad en las redes de radio. En este sentido, los sistemas RoF proporcionan la sinergia adecuada entre la óptica y el radio, lo cual permite la fusión de estas tecnologías, que han sido fundamentales en el avance de las telecomunicaciones, en las que las redes de acceso inalámbrico y de fibra están requiriendo de actualizaciones, con el fin de responder al aumento exponencial de la demanda de ancho de banda de las sociedades modernas de la información. Se espera que la próxima generación de redes de acceso garantice la disposición de servicios de banda ancha, y aplicaciones multimedia a los usuarios finales en cualquier momento y lugar [5].

La idea básica de proponer sistemas de redes inalámbricos basados en la tecnología RoF, se plantea como una alternativa un poco más económica y capaz de soportar la creciente demanda de ancho de banda. En redes de este tipo una estación controladora es conectada a numerosas estaciones base, las cuales son de estructura y características simples, vía fibra óptica. La función principal de la BS, es convertir la señal óptica a una eléctrica y enviarla por su antena transmisora al móvil y viceversa. Por tanto casi todo el procesamiento de la señal (incluyendo modulación, demodulación, codificación y enrutamiento) es desempeñado en la estación controladora. Lo que significa que la función de la red RoF es usar enlaces de fibra óptica para distribuir señales de RF entre la CS y las diversas BS.

Algunas de las ventajas y beneficios que ofrece la tecnología RoF comparado con la distribución de señales eléctricas RF se mencionan a continuación:

- ✚ Bajas pérdidas de atenuación.
- ✚ Gran ancho de banda.
- ✚ Inmunidad a la interferencia electromagnética.
- ✚ Fácil Instalación y mantenimiento.
- ✚ Reducción de consumo de energía.
- ✚ Asignación dinámica de recursos.

En los anexos se hace una descripción más detallada de estas ventajas y beneficios.

2.4.1. Arquitectura de los Sistemas RoF.

Dentro de la arquitectura de los sistemas RoF, se sabe que es una tecnología que trabajará en la banda de frecuencias extremadamente altas (*EHF, Extremely High Frecuencias*), que corresponden a las frecuencias entre los 30 y 300 GHz, también conocida como la banda de ondas milimétricas (*MMW, Millimeter Wave*), dentro de estas frecuencias se manejan anchos de banda nada despreciables, de alrededor de 7GHz [31].

Los sistemas de RoF transmiten señales de radio a través de la fibra óptica directamente hasta la BS. Cuando existen varias BS, un dispositivo pasivo, conocido como divisor (*splitter*), divide la señal a las BS, como se observa en la figura 2.19.

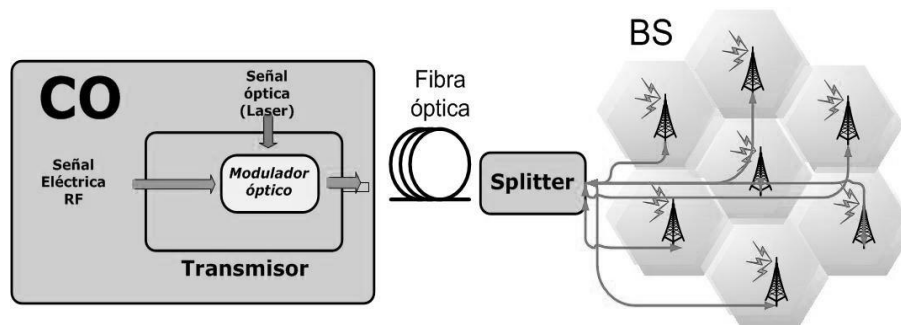


Figura 2.19 Sistema de radio sobre fibra [6].

Una de las ventajas más importantes de la tecnología RoF es la habilidad de concentrar lo más costoso del equipo de alta frecuencia en un lugar central u oficina central (*CO, Central Office*), lo cual permite la instalación del equipo restante en un lugar distante, debido a su sencillez, bajo peso, tamaño reducido y bajo consumo de potencia [5]. Entre otras ventajas adicionales se destaca el gran ancho de banda que proporciona la fibra en el transporte de señales de radiofrecuencia (RF). También el aumento de la flexibilidad operacional y el potencial para reutilizar o compartir entre una cantidad determinada de usuarios los servicios implementados. Con los sistemas de RoF, las BS solo son utilizadas para realizar la conversión opto-eléctrica, por lo que su configuración es más simple e independiente del protocolo y del formato de modulación. Hoy en día, la implementación y uso de servicios basados en IP se está llevando a cabo con conexiones de forma más inalámbrica, donde los usuarios finales por medio de sus teléfonos inteligentes acceden a internet y usan algún tipo de servicio. En la figura 2.20 se muestra una red heterogénea de banda ancha de próxima generación para diversos servicios.

Para tener uniformidad en la cobertura, los sistemas inalámbricos se configuran en un sistema de antenas distribuidas (*DAS, Distributed Antennas System*). Su implementación es un método común para extender la cobertura inalámbrica desde múltiples BS para múltiples ubicaciones. Los sistemas RoF están diseñados para desempeñar funciones de sistemas de radio, además de funciones de transporte y movilidad. Todas estas funciones incluyen modulación de datos, procesamiento de la señal y conversión de frecuencia [5].

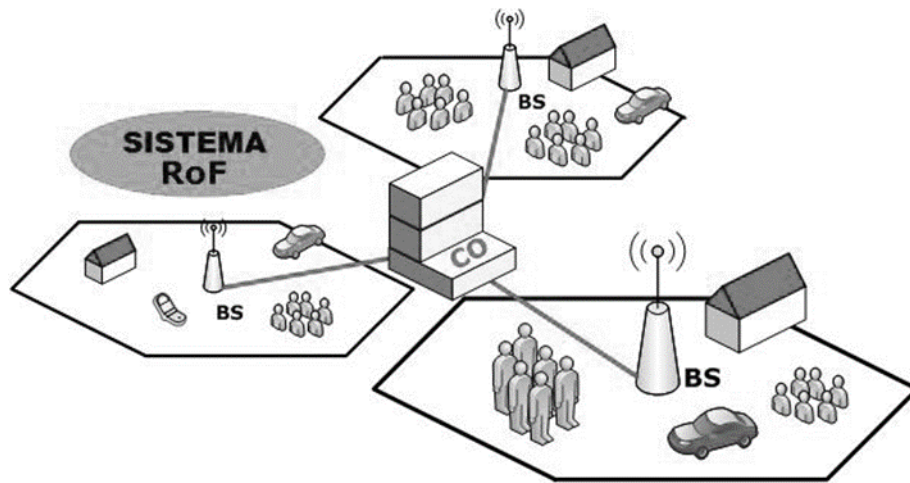


Figura 2.20 Redes de acceso heterogéneas de banda ancha de próxima generación [9].

Los sistemas de radio sobre fibra (*Radio-over-Fiber, RoF*), transmiten señales de radio a través de la fibra óptica desde un transmisor hasta una estación base, para transmitirlos a los consumidores finales mediante un enlace de radio, como se observa en la figura 2.21.

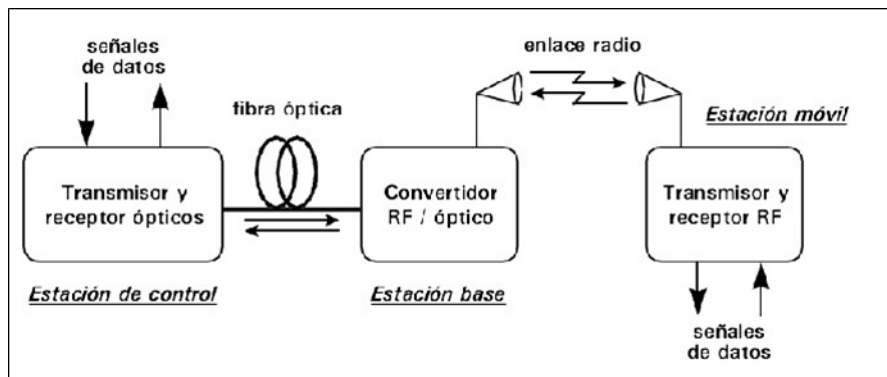


Figura 2.21 Configuración de un sistema de comunicaciones de Radio sobre fibra óptica [31].

El propósito principal de los sistemas *RoF*, es la distribución de señales de banda ancha a estaciones base (*BS, Base Station*) para acceso inalámbrico usando una red de acceso óptico. Por lo tanto un sistema *RoF* consiste de cuatro elementos principales, el transmisor óptico, la red de acceso óptico (canal de fibra óptica), las estaciones base y los receptores móviles o fijos.

En la estación de control (*CS, Control Station*) o transmisor óptico se realizan las funciones para generar la onda óptica milimétrica, así como para detectar la señal del enlace de subida. La longitud de la fibra para el canal de transmisión se mide desde la oficina central hasta la estación base, generalmente esta distancia está en el orden de las decenas de Kilómetros.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

Dentro del canal óptico, se tienen las llamadas no linealidades en las fibras ópticas, las cuales se dividen en dos categorías. Dispersión estimulada (*Raman y Brillouin*), y el efecto óptico Kerr debido a los cambios en el índice de refracción con la potencia óptica. Mientras que la dispersión estimulada es responsable de la pérdida o ganancia de la intensidad, el índice refractivo no lineal es el responsable del desplazamiento de fase de la señal óptica. Otra diferencia entre la dispersión estimulada y el efecto Kerr es que la dispersión estimulada tiene niveles de potencia de umbral en los cuales los efectos no lineales se manifiestan en la fibra, mientras que en el efecto Kerr no se tiene dichos niveles de potencia. Para reducir la dispersión de la señal óptica en la fibra, se pueden utilizar dos tipos diferentes de fibra por separado, una para la subida y otra para la bajada. En la estación base, es necesario implementar un detector óptico de alta velocidad para realizar la conversión opto-eléctrica de las señales ópticas milimétricas, para que posteriormente las señales eléctricas de radio sean impulsadas usando un amplificador de RF de alta potencia. Luego se emplea la antena para hacer una difusión de la señal de RF hacia los dispositivos receptores [31].

2.4.1.1. Modulación y detección de señales en sistemas *RoF*.

La modulación en los sistemas *RoF* se genera a partir de una modulación eléctrica y una óptica. Primero, se tiene la señal eléctrica modulada en formatos de amplitud, fase o frecuencia como en un sistema eléctrico convencional. La señal eléctrica generada debe tener las especificaciones requeridas por las aplicaciones inalámbricas, como *GSM, UMTS, WLAN, WiMAX*, entre otras (véase la tabla 2.5).

Tabla 2-5 Estándares inalámbricos

Estándares inalámbricos	Velocidad de transmisión	Frecuencia (Portadora)	Alcance
ZigBee	< 250 kbps	915 MHz, 2.4 GHz	Corto
WiBree	< 1 Mbps	2.4GHz	Corto
Bluetooth	< 1 Mbps	2.4GHz	Corto
Wireless USB	< 480 Mbps	3.1 GHz - 10.6 GHz	Corto
802.11b	< 11 Mbps	2.4GHz	Medio
802.11a/g	54 Mbps	2.4 GHz / 5 GHz	Medio
802.11n	< 300 Mbps	2.4 GHz / 5 GHz	Medio
GSM	9.6 kbps	900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz	Largo
GPRS 2.5G	171.2 kbps	900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz	Largo
EDGE 2.75G	473.6 kbps	900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz	Largo
UMTS (3G)	2 Mbps	1.8GHz a 2.2GHz	Largo
HSDPA 3.5G	14 Mbps	1900 MHz, 2100 MHz	Largo
HSPA+	42 Mbps	1700 MHz, 2100 MHz	Largo

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

WRAN	18 Mbps	54 MHz - 862 MHz	Largo
WiMAX	75 Mbps	2.3 GHz, 2.5 GHz, 3.5 GHz y 5GHz	Largo
NBWA	80 Mbps	< 3.5 GHz	Largo
LTE 4G	< 144 Mbps	1900 MHz - 3600 MHz	Largo
LTE advanced	< 1 Gbps	1900 MHz - 3600 MHz	Largo
WiGig	7 Gbps	2.4 GHz, 5 GHz y 60 GHz	Corto
Wireless HD	25 Gbps	60 GHz	Corto

En esta arquitectura de *RoF*, la portadora óptica es modulada por una señal de radio con una portadora de radiofrecuencia (*RF*), luego transmitida por un enlace de fibra óptica entre una estación de control (*CO*) y un conjunto de estaciones base (*BS*) (véase las figuras 2.20 y 2.21). El proceso de conversión eléctrico-óptica se hace por medio de la modulación del láser, la señal eléctrica permite que el láser module su intensidad óptica de forma "On-Off", y comúnmente se usa un fotodetector en el receptor, donde la señal es convertida del dominio óptico al dominio eléctrico antes de ser amplificada y radiada por una antena. Estos sistemas se conocen como *IM/DD* (*Modulación de intensidad/ Detección directa*). Los sistemas *IM/DD* son los más simples y los más implementados, pero para frecuencias mayores que los 10 GHz, modular el láser directamente trae problemas, debido a que el ancho de banda de este dispositivo es limitado. Por tal razón, para frecuencias mayores que los 10 GHz, los sistemas *IM/DD* usan modulación externa [5]. En este tipo de modulación son ampliamente usados el modulador Mach Zehnder (*MZM*, *Mach-Zehnder Modulator*) y el modulador de electro-absorción (*EAM*, *Electro-Absorption Modulator*). En la figura 2.22 se presenta una arquitectura común de un sistema *RoF*.

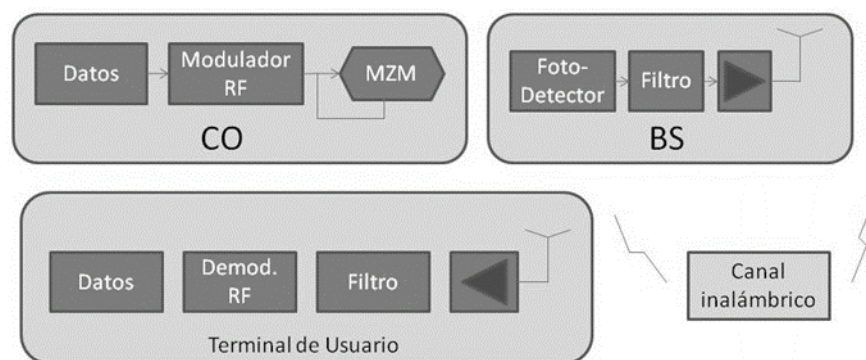


Figura 2.22 Arquitectura de un sistema RoF [5].

Otro método utilizado para la transmisión y transporte de señales RF por la fibra es la generación óptica remota de forma heterodina. Es un método en el cual más de una señal óptica es generada por la fuente de luz; una de las cuales es modulada por la señal que conlleva la información, luego son mezcladas o heterodinadas por un fotodetector o por un mezclador externo para formar la señal RF de salida [5]. La generación óptica

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

heterodina tiene como ventaja la generación de señales de alta frecuencia y es solo limitada por el ancho de banda del fotodetector. La generación heterodina soporta una detección de más alta potencia (mayor ganancia del enlace) y mayor relación portadora a ruido (*CNR, Carrier-to-Noise Ratio*) [8], ya que bajo ciertas condiciones las potencias ópticas de los dos campos ópticos interfieren, lo cual contribuye al aumento de la potencia de la señal óptica generada.

Por otra parte, los enlaces RoF que usan Modulación de Fase (*PM, Phase Modulation*) para la señal óptica presentan ventajas con respecto a los sistemas IM/DD, además de permitir la implementación de estaciones bases más simples. Sin embargo, los enlaces RoF-PM requieren un receptor óptico coherente combinados con módulos de DSP para la detección y la demodulación de señales lineales. La detección coherente en sistemas ópticos ha sido demostrada para realizar la demodulación de señales lineales de MMW, codificada sobre la fase de una portadora óptica [8] [31]. Las principales ventajas ofrecidas por los sistemas RoF-PM con detección coherente sobre los sistemas RoF IM/DD son:

- 1) Mayor Rango Dinámico de Estímulo Libre (*SFDR, Spur-Free Dynamic Range*).
- 2) Transmisión óptica de datos con mayor eficiencia espectral en formatos avanzados de modulación.
- 3) Mayor ancho de banda y selectividad del canal.
- 4) Menores requerimientos en la potencia de la señal de transmisión. Los receptores coherentes basados en DSP reconstruyen la señal microondas transmitida a partir de la fase óptica de la portadora, para luego realizar la demodulación. En la figura 2.23 se muestra un esquema de un receptor digital coherente para sistemas RoF-PM.

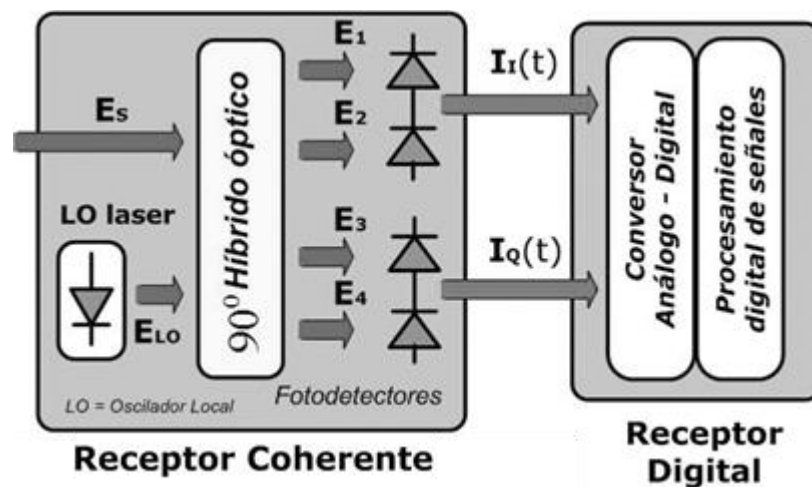


Figura 2.23 Receptor digital coherente para sistemas RoF-PM [31].

Las principales ventajas de los receptores digitales coherentes comparado con los receptores tradicionales son: 1) costo efectivo y de tamaño reducido, 2) compensación adaptativa de las imperfecciones del canal en el dominio

electrónico usando técnicas de procesamiento de señales, 3) versatilidad en el diseño y robustez en la operación, lo cual permite diferentes formatos usando el mismo hardware en el receptor [5].

Como se puede observar en la arquitectura de los sistemas *RoF*, la mayoría del procesamiento de señales (codificación, multiplexación, generación y modulación de radio frecuencia) se llevan a cabo en la estación de control CS (*CS, Control Station*), lo que hace que la estación base tenga costos menores y sea más eficiente. Entonces la tecnología *RoF* se convertirá en la tecnología de los sistemas de comunicaciones móviles de próxima generación. Al mismo tiempo, la tecnología de multiplexación *OFDM* está mostrando grandes ventajas en el aumento de la velocidad de procesamiento de señales, por lo cual también está siendo enfocada en los sistemas móviles 4G. Otro punto importante de la tecnología *RoF*, es que las señales de radio únicamente se transponen en una potadora óptica sin cambiar su formato de modulación. Esta habilidad para transmitir señales de radio en su formato nativo, da una ventaja adicional en la reducción de costos y simplificación de los puntos de acceso.

2.4.1.2. El Transmisor Óptico.

La función principal que debe cumplir el transmisor óptico, es la de generar las ondas ópticas milimétricas, las cuales serán las responsables de transportar las señales de RF hacia la estación base, la generación de estas señales y la configuración simple de las estaciones base son técnicas clave en la disminución de costos y el aumento del desempeño de las redes de acceso ópticas basadas en *RoF*. Sin embargo, la generación de las ondas ópticas milimétricas a frecuencias por encima de los 40 GHz supone un desafío mayor ya que esto se encuentra limitado por la respuesta de frecuencia que tienen los moduladores ópticos, por ejemplo el modulador externo Mach-Zehnder, el cual posee buena respuesta por debajo de 40 GHz, por lo tanto es de gran interés en la comunidad científica, un método para la generación de señales ópticas cuya respuesta a frecuencias mayores sea mejor y el costo de los equipos más barato.

Para enlaces de *RoF*, las portadoras ópticas milimétricas pueden ser generadas a través de osciladores locales, sin embargo la eficiencia disminuye cuando la frecuencia portadora aumenta. También existe otra aproximación para este objetivo, basada en la técnica de heterodinación óptica la cual presenta mayor precisión y bajo ruido de operación [31].

En concordancia con lo expuesto en [8], [10], [31], a continuación se presentan los métodos conocidos para la generación de estas ondas:

- **Conversión ascendente en las estaciones base.**

En este método no se utilizan señales en la banda de radio frecuencia, en lugar de eso, una señal de frecuencia intermedia es transportada sobre la fibra óptica. La conversión ascendente de frecuencia intermedia a radio frecuencia *RF* se la realiza al nivel de la estación base, en la cual un oscilador local es el encargado de generar la onda portadora milimétrica. Una ventaja de esta conversión es que los efectos de dispersión cromática no

afectan a la señal transportada debido a que su ancho de banda es mucho más estrecho que el que ocuparía la señal de *RF*. Por otro lado, una clara desventaja está en que para la conversión ascendente de frecuencia intermedia a radio frecuencia se requiere de un mezclador y de un oscilador local para cada una de las estaciones base que sean necesarias en la red, lo cual resultaría en el incremento de equipos y por lo tanto el incremento de costos de implementación.

- **Heterodinación óptica.**

Básicamente el funcionamiento de esta técnica consiste en que si dos ondas ópticas de diferentes longitudes de onda inciden en un fotodetector, esto generará un pulso eléctrico a la salida del mismo con una frecuencia correspondiente a la longitud de onda que existe de separación entre las señales ópticas incidentes. Esta técnica es capaz de generar señales eléctricas de frecuencias que llegan hasta la banda de los THz pero se ve limitada por el ancho de banda del fotodetector, sin embargo, se presenta una desventaja importante debido a que el hecho de chocar dos ondas ópticas generadas por diodos láser lleva a que la señal microonda que se genera tenga un elevado ruido de fase, ya que las fases de dos señales ópticas no están correlacionadas. Por esta razón, durante los últimos años se han propuesto varias técnicas para generar señales microondas o señales ópticas de bajo ruido de fase con las dos ondas ópticas cerradas en fase.

- **Modulación externa con amplificador óptico semiconductor reflectante (*RSOA, Reflective Semiconductor Optical Amplifier*).**

Esta técnica utiliza la luz de una fuente óptica en el transmisor por lo tanto no requiere de una fuente óptica en la estación base, lo que conllevaría a una disminución de costos de equipos en la estación base, sin embargo, para separar la luz incidente de la reflejada se hace necesaria la implementación de un circulador óptico, lo cual incrementa la complejidad y costo de este tipo de enlaces, además que se necesita de una técnica de filtrado para minimizar el ruido de la emisión óptica.

Este tipo de técnica también provee flexibilidad hablando en términos de longitud de onda y puede ser fácilmente implementada en arquitecturas para fibras de alta capacidad. Otra ventaja importante que presenta esta técnica es que no tiene una longitud de onda de funcionamiento pre establecida, a diferencia de las otras técnicas, lo cual permite que el mismo tipo de dispositivo pueda ser usado para todas las estaciones base, lo cual resultaría bastante efectivo disminuyendo los costos de las redes extensas. Los amplificadores *RSOA*, pueden ser obtenidos comercialmente, pero aún es una tecnología inmadura, especialmente para aplicaciones analógicas, razón por la cual continua en desarrollo.

- **Modulación externa con moduladores *MZM* y *EAM*.**

Un método anterior a la modulación externa consistía en la modulación de intensidad, el cual genera una señal óptica mediante un láser dependiendo de la corriente que circule a través de él. A pesar de la simplicidad que este método presentaba comparado con la modulación externa, se ha verificado que la modulación de intensidad directa, no resulta apropiada cuando se trabaja en la banda de las ondas milimétricas, esto debido

a los límites de ancho de banda que presenta la modulación directa del láser. Esto explica por qué a frecuencias más altas de trabajo, se deja de utilizar la modulación de intensidad y se pasa a trabajar con moduladores externos. Esta técnica de modulación por sobre todos los esquemas conocidos, es una muy buena opción para generar las ondas ópticas milimétricas con una pureza espectral alta (bajo ruido).

El método de modulación utiliza moduladores externos de alta velocidad, como el modulador Mach-Zehnder (*Mach-Zehnder Modulator*) de tipo interferométrico, o los moduladores de electro-absorción (*Electro-Absorption Modulator, EAM*). Mientras que los moduladores externos, presentan arquitecturas simples, estos presentan ciertas desventajas como la pérdida de inserción significativa, y más que todo este método sufre de distorsión debido a la no linealidad intrínseca de los moduladores, elevado consumo de energía y complejidad. Debido a esto, se han presentado varias investigaciones hasta la presente, para generar las señales ópticas milimétricas con moduladores externos disminuyendo sus desventajas.

- **Modulación de intensidad con detección directa (IM-DD).**

Es la opción de modulación óptica más simple para implementar, la cual utiliza un láser de retroalimentación distribuida (*DFB, Distributed Feedback*), estos dispositivos están disponibles comercialmente para aplicaciones analógicas con una alta eficiencia, bajo ruido y poca distorsión. Los diodos DFB garantizan un funcionamiento entre 1270nm a 1610nm de longitud de onda, los tipos más comunes que se utilizan son el *Fabry-Perot* (FP) y el láser de cavidad vertical (*Vertical Cavity, VCSEL*), debido a que tienen una estabilidad mayor y mejor desempeño ante el ruido.

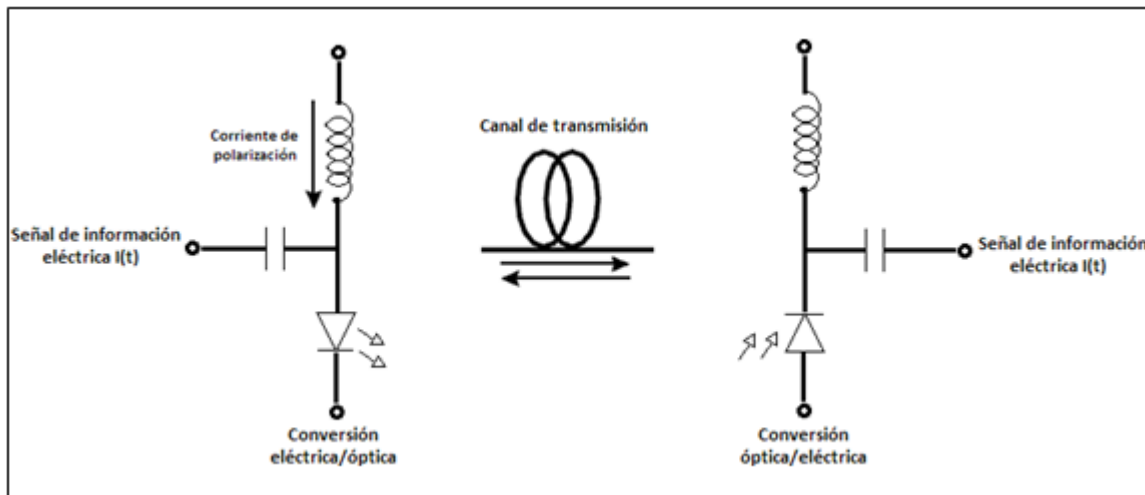


Figura 2.24 Esquema de una modulación de Intensidad y Detección Directa [31].

Su funcionamiento básico se centra en el diodo láser (portadora), el cual es modulado por la señal de datos o información a transmitirse (modulante), de esto se obtiene una señal óptica modulada cuya potencia óptica es proporcional a la información enviada, en el emisor se realiza el proceso eléctrico-óptico.

En el receptor se realiza lo contrario, la conversión óptica-eléctrica de manera directa, mediante los llamados detectores de ley cuadrática, los cuales se componen principalmente de diodos PIN, cuya función principal en el receptor es detectar las variaciones de potencia y transformarlas en variaciones de intensidad.

Se debe tomar en cuenta que el espectro de esta modulación, va a estar compuesto por varias bandas laterales réplicas de la señal principal, esto debido a que no se modula la amplitud del campo eléctrico de la señal que se transmite por la fibra, sino que se modula directamente la intensidad o potencia óptica de la señal [31].

- **El modulador de electro absorción (EAM).**

Este tipo de modulador está basado en la dependencia con el campo eléctrico de la frontera de la banda de absorción que presentan ciertos materiales, los cuales son capaces de absorber la radiación, por lo tanto permiten controlar cuanta potencia se deja pasar dependiendo de la diferencia de potencial aplicada en sus extremos.

Cuando hablamos de materiales semiconductores, esta propiedad de controlar la potencia que se deja pasar y de absorber radiación se conoce como efecto Franz-Keldysh o efecto Stark, los cuales establecen que las longitudes de onda que absorben estos materiales están controladas por la variación del campo eléctrico aplicado en sus extremos.

Los moduladores de electro absorción EAM, presentan muchas ventajas como son:

- Fácil integración con el diodo láser
- Tensión de activación baja
- Poca acumulación de DC
- Bajo consumo de potencia
- Tamaño pequeño del equipo
- Capacidad de integración con otros dispositivos semiconductores.

Sin embargo, las características de transmisión no lineales propias de este modulador, hacen que sea necesario adoptar técnicas de linealización complejas, como el uso de dos moduladores EAM en paralelo, métodos para compensar la distorsión, entre otros, los cuales resultan bastante complicados de implementar y aumentan los costos de los dispositivos. [31].

- **El modulador Mach-Zehnder (MZM).**

El modulador externo más conocido y ampliamente usado en la actualidad es el modulador *Mach-Zehnder*, conocido así porque su funcionamiento se basa en los interferómetros *Mach-Zehnder* y en ciertos materiales

con propiedades electro-ópticas. Para entender el funcionamiento del modulador *MZM*, se parte de la explicación del funcionamiento del interferómetro Mach-Zehnder, el cual se basa en el fenómeno de la interferencia entre ondas. La señal de entrada es dividida en dos partes iguales, cada una de estas dos partes viaja por caminos distintos, y posteriormente se vuelven a combinar, ahora, se conoce que como resultado de esta combinación se puede obtener una interferencia constructiva si no existe diferencia entre las fases de ambas señales, de esta manera se reconstruye la señal original de entrada, pero si la diferencia de fase de las señales combinadas no es nula, se crea una interferencia destructiva, con lo cual no es posible obtener la señal original nuevamente.

Basados en una estructura similar al interferómetro MZI, y fabricados comúnmente en Niobato de Litio (LiNbO_3), aunque a veces se fabrican también en Arseniuro de Galio (GaAs), los moduladores *Mach-Zehnder* suponen una gran ventaja debido a que aumentan la velocidad de modulación a la vez que reducen la modulación de fase residual, más conocida como chirp.

La razón para que los moduladores *Mach-Zehnder* en su estructura contengan Niobato de Litio (LiNbO_3), es debido a que este tipo de cristal, posee una propiedad conocida como efecto electro óptico, el cual dependiendo del campo eléctrico que se le aplique varía su índice de refracción, con lo cual se puede controlar a la señal óptica que viaja por este cristal, siguiendo las variaciones de campo eléctrico que se le aplican [10] [16].

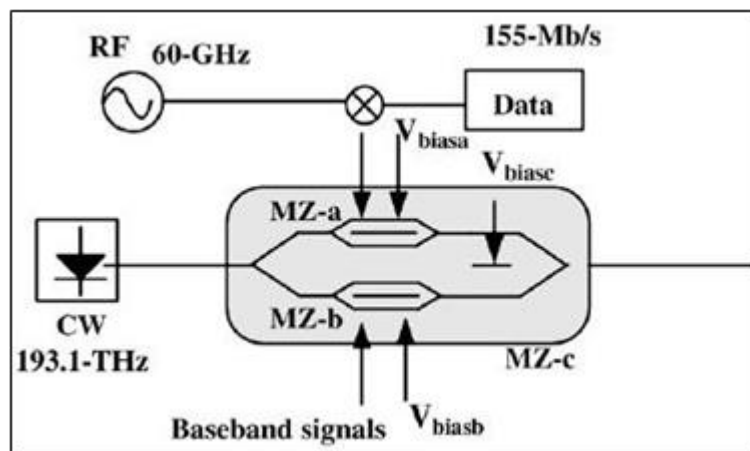


Figura 2.25 Esquema de modulación de la señal banda base y RF con modulador *MZM* [31].

La figura 2.25 muestra un ejemplo de un sistema con modulador externo Mach-Zehnder y su simbología, en este caso se utiliza el principio de modulación simultánea de banda base y RF, este ejemplo utiliza un modulador Mach-Zehnder de LiNbO_3 , comprendido por tres electrodos MZM dobles, lo cual en este caso es la clave para generar la señal óptica RF y banda base [31].

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

En los anexos se describe en detalle las no linealidades de la fibra óptica, los cuales hacen que se limiten los sistemas de RoF y se describen también con más detalle los métodos de generación y transporte de señales RoF que se nombraron anteriormente de manera general.

En la tabla 2.6 se muestra la comparación entre técnicas de generación y transporte para señales RoF.

Tabla 2-6 Comparación entre técnicas de generación y transporte para señales RoF

TÉCNICA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Heterodino Óptico	Capacidad de modulación completa	Fuente de luz complicada
	Libre de efectos de dispersión	
	No necesita	
Modulación Externa	Configuración simple	Alta pérdida por inserción
	Usa láser DFB	Respuesta no lineal
		En altas frecuencias necesita un EAM
Conversión de frecuencias hacia arriba y hacia abajo	Modulación directa en IF	Usa oscilador de ondas milimétricas
	Libre de efectos de dispersión	En altas frecuencias necesita un EAM
Transceptor Óptico	Sirve como modulador y foto detector	En altas frecuencias necesita un EAM
		Para distribución usa WDM

2.4.2. Evolución y Tendencia de la Tecnología RoF.

Los usuarios finales de las redes inalámbricas y cableadas están demandando grandes volúmenes de información a elevadas velocidades. En este escenario, los sistemas basados en RoF y de fibra hasta el hogar

(*FTTH, Fiber to the Home*) son los candidatos más prometedores para dar soporte a estos requerimientos de las redes de acceso. Las redes de acceso de próxima generación progresan hacia la convergencia de servicios cableados e inalámbricos, con el objetivo de ofrecer eficientemente servicios de gran ancho de banda a bajo costo. Los sistemas RoF lideran el progreso de las redes de acceso mediante los avances significativos en aspectos como: el incremento en la capacidad de transmisión y el ancho de banda, así como la disminución de los costos de las redes fijas y móviles [32]. En esta red de configuración híbrida hay un punto clave en el éxito de su operación que consiste en la generación y la transmisión de señales a alta velocidad en modo cableado o inalámbrico de manera simple y confiable.

En los últimos años se ha observado el gran avance de las aplicaciones multimedia como la televisión de alta definición (*HDTV, High Definition Television*) y video 3D, las cuales exigen un gran ancho de banda, no suministrado totalmente por las actuales interfaces, para el acceso inalámbrico de estos servicios [5]. Este hecho ha estimulado el desarrollo de sistemas de comunicación inalámbrica a altas velocidades, para la provisión de servicios con la misma capacidad de transmisión de las redes cableadas. Por esta razón, se empezó a estudiar nuevas regiones del espectro, debido a que la alta demanda en la tasa de transmisión produjo una congestión en las bandas actuales: GSM, W-CDMA, Wi-MAX, entre otras. Este suceso resultó en un gran interés de la comunidad científica por investigar en los temas referentes a la generación y transmisión de señales microondas y de onda milimétrica. Aunque los sistemas convencionales de redes WLAN (IEEE802.11a, b y g) ofrecen teóricamente tasas de transmisión de 54 Mbps, las alternativas más modernas, como Banda Ultra Ancha (*UWB, Ultra Wide Band*) y sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), son capaces de extender la velocidad de transmisión inalámbrica a varios cientos de Mbps, teniendo como objetivo alcanzar hasta 1 Gbps en un futuro cercano ; sin embargo, esta velocidad no es suficiente para transmitir señales de televisión HDTV en vivo, dado que solo un stream de HDTV (1080i) sin comprimir requiere una tasa de transmisión de alrededor de 1,5 Gbps [10], [30], [33].

Hace casi dos décadas se empezaron a estudiar los sistemas de RoF con MMW, pero estos no modulaban la señal de MMW dentro de la portadora óptica en la fibra, por lo que se necesitaba una BS compleja para la conversión [20]. El uso de señales de radio sobre fibra en sistemas de antenas distribuida (*F - DAS*) desplaza el procesamiento electrónico de la antena a un punto central (CO), abriendo nuevas oportunidades en la creación de redes híbridas, las cuales aún no han sido plenamente explotadas. Cambiar la ubicación de los equipos significa que la capacidad ahora se puede reasignar a cualquier punto de la red, en lugar de ser fijada por el equipo que se instala en una BS particular.

Otro de los grandes retos que se tienen en el área de la RoF es poder tener unidades de antenas remotas (*RAU, Remote Antenna Units*) que puedan cubrir múltiples bandas facilitando su distribución. En este escenario se podrían implementar esquemas de asignación dinámica de ancho de banda, con el fin de proporcionar eficientemente el ancho de banda a los usuarios finales, los cuales cambian dinámicamente su demanda de acuerdo con los servicios requeridos en diferentes instantes y lugares. De esta manera, este tipo de redes ofrece una ventaja adicional basada en la posibilidad de cambio de capacidad asignada, la cual puede variar en la red de acuerdo con las densidades de tráfico y las demandas de los usuarios [5] .

El enorme ancho de banda ofrecido por la fibra tienen otros beneficios aparte de la alta capacidad para transmitir señales microondas. El gran ancho de banda óptico permite el procesamiento de señales a alta velocidad que podría ser más difícil de hacer en sistemas electrónicos; por ejemplo, el filtrado de señales de MMW se puede lograr convirtiendo la señal eléctrica a óptica y realizar el filtrado usando componente ópticos basados en redes de Bragg en fibra óptica (*FBG, Fiber Bragg Grating*) o el interferómetro Mach Zender (*MZI, Mach Zender Interferometer*). No obstante, el gran problema al transmitir señales de MMW sobre fibra óptica es la degradación de la señal debido a las dispersiones de la fibra. Una de ellas, la dispersión cromática, es el fenómeno más relevante que afecta estos sistemas, ya que causa la Interferencia Intersímbolo (*ISI, intersymbol Interference*), debido al ensanchamiento temporal de los pulsos en el receptor [21]. Este fenómeno depende de las componentes espectrales de la fuente de luz, de la frecuencia de la portadora y la longitud de la fibra. Los sistemas inalámbricos de MMW con canales de ancho de banda por encima de los 10 GHz podrían fácilmente proveer capacidades multi-Gbps, incluso con formatos de modulación simples como ASK o QPSK. Estos sistemas son sugeridos como una posible alternativa no solo para el acceso óptico sino también para futuras redes de retorno (*backhauling*) móviles, debido a que evitarían el cuello de botella que presentarían las futuras redes LTE (*LTE, Long Term Evolution*), que llegarían a velocidades de 1 Gbps. La banda ubicada en el rango de los 75 y 110 GHz, denominada banda W, es de interés particular, debido a que presenta una ventana de transmisión más amplia, con pérdidas mínimas de propagación, y sería más adecuada para aplicaciones multiGbps en exteriores en un futuro cercano. Se espera la introducción del estándar Ethernet inalámbrico de 10 Gbps, que soporte la convergencia de sistemas cableados e inalámbricos en el acceso, y así permita garantizar una adecuada función de backhauling en una red de telefonía móvil en un futuro próximo [5], [10], [30], [33].

Los principales retos de los sistemas fotónicos basados en MMW son: mejorar el desempeño de los dispositivos que los integran, adaptar estos sistemas a la región espectral de operación, aumentar la eficiencia de conversión de los dispositivos opto-electrónicos e incrementar su rango dinámico, compensar las dispersiones de la fibra, y a su vez, reducir los costos de estos avances tecnológicos. Se espera que la tecnología RoF pueda proveer una arquitectura que soporte múltiples servicios y estándares de radio, que sea flexible y confiable, con BS cada vez más simplificadas.

2.5. TECNOLOGIA FTTx.

La Fibra Óptica ha demostrado ser la tecnología más importante para las redes de Telecomunicaciones de próxima Generación, proporcionando plataformas de conectividad de alta o ultra alta velocidad. No sólo las redes de acceso fijo se benefician de las soluciones por Fibra óptica, también las redes inalámbricas, especialmente las relacionadas con el aumento de la capacidad de interconexión entre puntos de presencia de los operadores.

Tanto la implantación de Redes fibra Óptica como la multitud de soluciones que incluyen las partes activas de la red, el despliegue y funcionamiento, la gestión, facturación y control de suscriptores además del gran reto de superar la competencia de las soluciones coaxiales o basadas en cobre, implican un gran cambio para los operadores. Las Tecnologías de cobre y coaxial continúan desarrollándose y exprimiendo más y más el ancho de banda.

La especificación *DOCSIS 3.1* por ejemplo, puede soportar descargas más allá de los 15 Gbps en anchos de banda de 258 – 1794 MHz, lo que convierte el cobre en una alternativa competitiva para los operadores tradiciones que insisten con tecnologías HFC.

Es natural que los operadores quieran y necesiten usar su base instalada de cobre, sin embargo, es cada vez más evidente que la migración a redes de Fibra Óptica está completamente en marcha. Esto no sólo se debe a las grandes velocidades de enlace descendente, sino a calidad de servicio superior, lo que permite mayores velocidades de enlace ascendente para acceder a servicios en la nube, latencia menor y mayor economía, haciendo que la tecnología soportada en Fibra (*FTTx*) sea más competitiva en los próximos años. Algunos de los operadores tienen dificultades para prever los beneficios económicos a corto plazo, pero la mayoría sabe, que es clave para lograr la competitividad a largo plazo.

Una interesante tendencia digna de mencionar es que la tecnología *FTTx* no se limita al “hogar” o al usuario final. Con la introducción de nuevas normas, como la *NG-PON2*, las redes *FTTx* podrán asumir más funciones, tales como backhaul móvil y front haul, los clientes empresariales y la conectividad en la Nube [34].

2.5.1. Arquitectura *FTTx*

Fibra a la x (*FTTx*) es un término genérico para cualquier banda ancha utilizando la arquitectura de red de fibra óptica para reemplazar todo o parte del metal habitual bucle local utilizado para la última milla de las telecomunicaciones. El acrónimo *FTTx* es conocido ampliamente como Fibre-to-the-x, donde x puede denotar distintos destinos.

Según [38], 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 2.26.

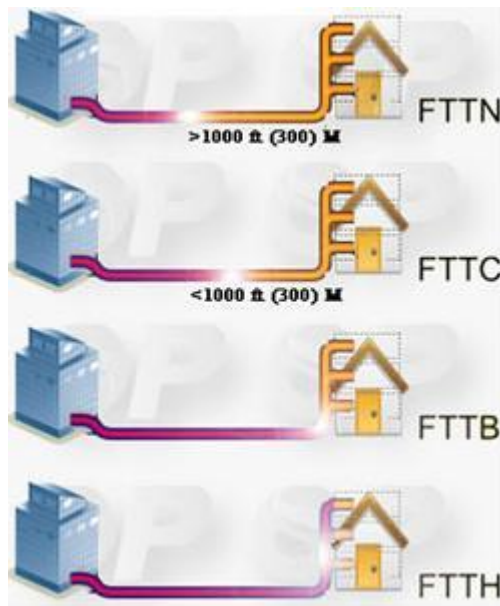


Figura 2.26 Clases de FTTx [35].

Los más importantes según [34] son:

➤ **FTTH**

Conocida como **fibra hasta el hogar**, enmarcada dentro de las tecnologías FTTx, se basa en la utilización de cables de fibra óptica y sistemas de distribución ópticos adaptados a esta tecnología para la distribución de servicios avanzados, como el *Triple Play*: telefonía, Internet de banda ancha y televisión, a los hogares y negocios de los abonados.

La tecnología FTTH propone la utilización de fibra óptica hasta el domicilio del usuario. La red de acceso entre el abonado y el último nodo de distribución puede realizarse con una o dos fibras ópticas dedicadas a cada usuario (una conexión punto-punto que resulta en una topología en estrella) o una red óptica pasiva (del inglés Passive Optical Network, PON) que usa una estructura arborescente con una fibra en el lado de la red y varias fibras en el lado usuario.

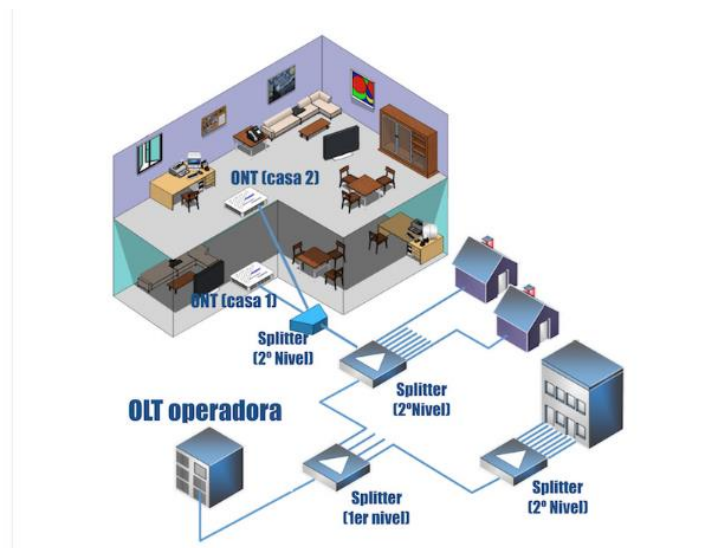


Figura 2.27 Fibra hasta el hogar [36].

➤ FTTE

FTTE es una arquitectura compatible con los estándares del sistema de cableado estructurado que se extiende la red troncal de fibra de la sala de equipos, a través de la sala de telecomunicaciones, y directamente a un recinto de telecomunicaciones (TE) instalado en un espacio común para servir a un número de usuarios en un área de trabajo. Su aplicación se basa en la TIA/EIA-569-B "Caminos y Espacios", la cual define el recinto de Telecomunicaciones (TE), y TIA/EIA-568-B.1 Addendum 5, que define el cableado cuando un TE es utilizados.

La arquitectura permite FTTE para cualquier elección los medios de comunicación de la TE en el área de trabajo, ya que puede ser de cobre de par trenzado balanceado, fibra óptica multimodo o monomodo de fibra óptica o inalámbrica, incluso si un punto de acceso está instalado en o cerca de la TE.

➤ FTTC

FTTC es un método de servicios de banda ancha de alta velocidad para negocios y hogares, acortando la distancia que viaja la conexión de la línea de cobre. Esto se logra mediante la instalación de "DSLAM de la calle" que actúan como un cambio pequeño cerca de la casa o negocio. La conexión entre estos DSLAM Street y la central telefónica es de fibra (por lo tanto de fibra hasta el gabinete). El resto de la distancia entre el DSLAM calle y las instalaciones del cliente es el cobre, pero la distancia es lo suficientemente corto como para usar la tecnología VDSL (muy alta velocidad de línea de abonado digital), que tiene una velocidad máxima de carga teórica de 10 Mbps y una velocidad de descarga de 40Mbps.

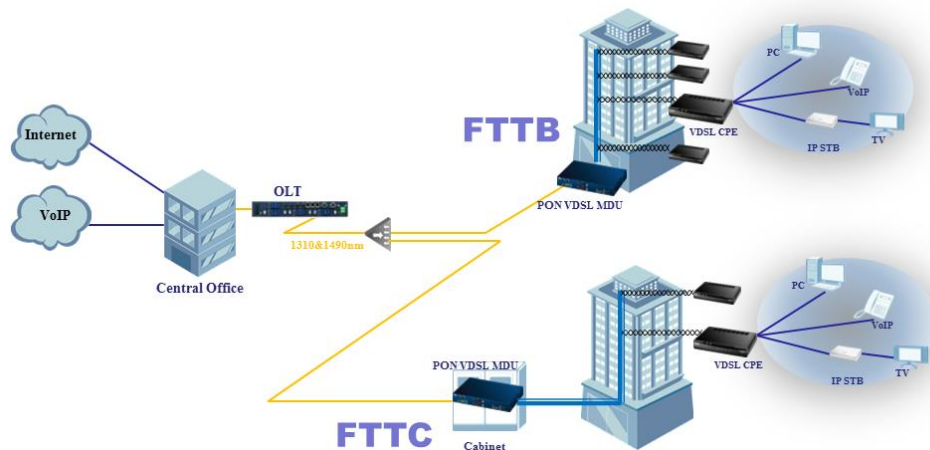


Figura 2.28 Fibra hasta el Gabinete [37].

➤ **FTTB**

Fibra hasta el edificio o también llamada fibra hasta el sótano *FTTB* es una forma de prestación de comunicación de fibra óptica que necesariamente se aplica sólo a aquellas propiedades que contienen viviendas múltiples o espacios de trabajo (ver figura 2.28). La fibra óptica termina antes de que realmente llega a los suscriptores que viven o trabajan en el espacio en sí, sino que se extiende a la propiedad que contiene ese espacio que viven o trabajan. La señal se transmite a la distancia final utilizando todos los medios no ópticos, incluyendo par trenzado, cable coaxial, conexión inalámbrica, la comunicación o la red eléctrica.

➤ **FTTN**

Fibra hasta el nodo (FTTN), también llamada fibra para el barrio o la fibra hasta el armario (FTTCab), es una arquitectura de telecomunicaciones basados en cables de fibra óptica para ejecutar un armario que sirve un barrio. Normalmente, los clientes conectarse a este aparato con cable coaxial tradicional o el cableado de par trenzado. El área servida por el gabinete es por lo general menos de 1.500m de radio y puede contener varios cientos de clientes. (Si el gabinete atiende un área de menos de 300 m de radio luego de la arquitectura que se suele llamar la fibra hasta la acera).

Fibra hasta el nodo permite el suministro de servicios de banda ancha, como Internet de alta velocidad. Protocolos de comunicaciones de alta velocidad, tales como acceso de banda ancha por cable (DOCSIS general) o alguna forma de línea de abonado digital (DSL) se utilizan entre el gabinete y los clientes. Las tarifas

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

de datos varían de acuerdo con el protocolo exacto utilizado y de acuerdo con lo cerca que el cliente es el gabinete.

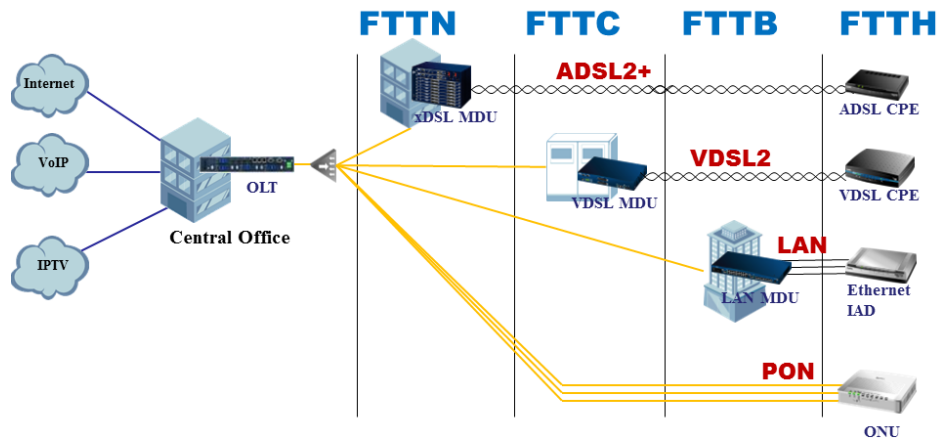


Figura 2.29 Fibra hasta el nodo [37].

➤ FTTP

La fibra óptica hasta las instalaciones FTTP se refiere a un tipo de tecnología de telecomunicaciones donde se utilizan cables de fibra óptica para conectar el equipo de distribución que se encuentra más cercano al usuario destinatario de la conexión directamente a la red principal de telecomunicaciones.

La diferencia entre FTTP y FTTH (FTTH, *Fiber To The Home*) radica en que la conexión FTTH tiene un alcance directo hasta el espacio físico donde se encuentra el destinatario final de la conexión (hogar, negocio, etc.) mientras que la conexión de tipo FTTP se realiza hasta "el equipo distribuidor más cercano" al destinatario, llegando hasta el lugar físico donde se encuentra el destinatario de la conexión por otros medios como pueden ser cable coaxial o par trenzado de cobre, entre otros.

➤ FTTD

Conexión de fibra óptica se instala desde la sala de ordenadores principales de un terminal o un convertidor de fibra media, cerca de la mesa de los usuarios

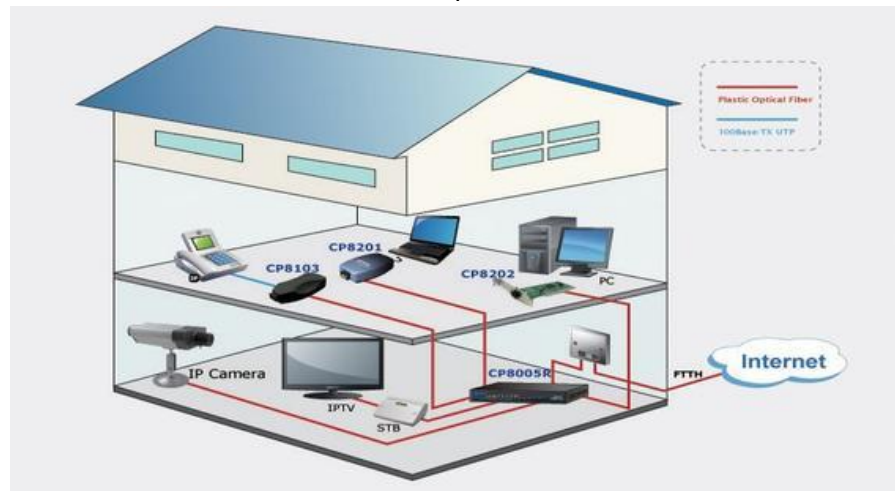


Figura 2.30 Configuración FTTD [37].

➤ **FTTA**

Diferente del modelo FTTB, la señal óptica transmitida por la prestadora de servicios pasa por un splitter óptico ubicado en la sala de equipos del edificio de atención, dividiéndose y transmitiéndose individualmente a cada departamento/oficina.

Comparación de las distintas tecnologías FTTX

En la tabla número 2.7 se resumen las FTTX en términos de la distancia.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

Tabla 2-7 Tipo de Red FTTX vs Distancia al usuario

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.

Es importante decir que hay otros tipos de configuraciones algo menos utilizadas, pues no están estandarizadas:

- FTTCab (Fiber-To-The-Cabinet): fibra hasta el armario.
- FTTP (Fiber-To-The-Premises): se suele utilizar de dos formas distintas: como término genérico para designar las arquitecturas FTTH y FTTB, o 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.

En resumen, se realizó una descripción teórica y generalizada de las redes ópticas, la tecnología OFDM, sus principales características y ventajas que se tiene sobre otra tecnología; así mismo, se describió la arquitectura de radio sobre fibra óptica, sus ventajas y desventajas en las redes de nueva generación y se finalizó con una descripción de las redes de acceso FTTx. A continuación, se procede con el capítulo tres de este trabajo de grado, donde se describe la metodología a seguir y los escenarios de simulación con el fin de cumplir con los objetivos propuestos.

3. CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE DESARROLLO Y SIMULACIÓN.

Este capítulo describe la metodología de simulación de equipos de telecomunicaciones, su adaptación y aplicación. Se incluye también la selección de la herramienta de simulación en redes ópticas. Finalmente, se realiza el modelo conceptual y se define una red característica como un modelo (abstracción de la realidad) con sus respectivos escenarios y configuración de parámetros, en el entorno que ofrecen las herramientas software.

En el presente capítulo se consignan los procesos de diseño para los diferentes escenarios que se proponen en la simulación y así realizar la evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF.

Tomando como base la arquitectura FTTH-GPON y RoF (estudiada en los capítulos 1 y 2), se hace un modelo de red orientado a componentes (modular), finalmente se diseña el módulo de RoF de la red partiendo de condiciones que se asumen para lograr un diseño acorde con los modelos de red más utilizados a nivel de investigación.

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN.

El amplio campo de la simulación es muy importante en el área de la investigación. El modelado de los sistemas de comunicaciones es fundamental, antes de su implementación real.

Es importante tener en cuenta que se necesita tener un profundo conocimiento sobre el fenómeno que se desea simular, con el fin de que una vez se modele se tenga una presentación confiable del mismo [39].

3.1.1 Fundamentos Teóricos.

La abstracción es el principio de ignorar aquellos aspectos de algo (cosa, sujeto, etc.) que no sean relevantes para un propósito en general, con el fin de concentrarse más fijamente en aquellos que sí son relevantes.

Un sistema es una colección de entidades (objetos) que interactúan a través del tiempo para cumplir una serie de objetivos o metas. Es importante decir que los sistemas se clasifican en discretos y continuos, según el estado de las variables presentes en dicho sistema.

Un modelo es una representación en lógica matemática que se desarrolla para interpretar el sistema en términos de sus entidades y sus características (atributos). Es de importancia recalcar que el comportamiento del modelo es la representación del comportamiento del sistema. Los elementos de un modelo son: procesos, variables y relaciones funcionales [39].

Según [39], Los modelos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Según la forma en la cual cambian las variables en el tiempo pueden ser: discretos o continuos.
- Según el comportamiento de las variables pueden ser: determinísticos o estocásticos (probabilísticos).
- Según el manejo del tiempo pueden ser: estáticos o dinámicos.

La simulación es un proceso que permite observar el comportamiento de un sistema a partir de cierto nivel de abstracción, para alcanzar el grado de representación que satisface las expectativas preestablecidas. Además la simulación es el arte y la ciencia de experimentar con modelos, los cuales representan el comportamiento de un ente real que generalmente consiste en un sistema físico.

Un modelo de simulación es la herramienta que permite conocer y estudiar el comportamiento de un sistema cuando se toman en consideración los aspectos de mayor interés a ser simulados.

El tipo de modelo de simulación de evento discreto es un modelo dinámico, estocástico y discreto. En general este tipo de modelo cubre las distintas posibilidades de simulación por computador que pueden presentarse en los sistemas de telecomunicaciones (sistemas ópticos).

3.1.2 Formulación de la Metodología.

En concordancia con [39], una metodología tiene distintas etapas que permiten modelar y simular cualquier sistema de comunicaciones. De acuerdo a la ingeniería del software existen tres fases para el tratamiento y la solución de un problema.

1. *Fase de definición:*
En esta fase se realiza la identificación de la información disponible acerca del problema, en otras palabras aquí se busca “¿el qué?”.
2. *Fase de desarrollo:*
En esta fase se realiza la identificación de cómo hacerlo, en lo referente al diseño de la estructura y a la arquitectura del software necesario; en otras palabras aquí se busca “¿el cómo?”.
3. *Fase de mantenimiento:*
En esta fase se realizan los aspectos asociados a la corrección de errores.

Es importante resaltar que existen distintas etapas para cumplir con la metodología, la cual se adapta y se aplica al contexto de este trabajo de grado. Estas etapas o pasos según son:

1. Formulación del problema y plan de estudios (fundamentos teóricos).
2. Recolección y procesamiento de datos.
3. Definición de un modelo conceptual.
4. Formulación de un modelo de simulación (definición de modelo de red: escenarios de simulación).
5. Diseño de experimentos (pruebas).
6. Elaboración del programa de computador (implementación de escenarios de simulación).
7. Evaluación del modelo y de los parámetros estimados.
8. Validación del programa (escenarios de simulación).
9. Análisis de los datos obtenidos con la simulación.
10. Obtención de resultados (evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF).
11. Documentación de resultados.

Dentro del contexto anterior, es preciso tener en cuenta los siguientes dos aspectos:

- Un programa puede entenderse como: un lenguaje de programación de propósito general (C++, Java, etc.); o programas de computador (paquetes) diseñados para trabajar en simulación propiamente dicha (Matlab, OptiSystem, OptSim, entre otras).
- No se trata de implementar una herramienta de simulación sino de encontrar una que posibilite implementar los escenarios de simulación que permitan validar el desarrollo establecido; es decir, se utiliza para lograr los objetivos planteados en este trabajo.

3.2. ESTUDIO PREVIO DE ALGUNAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN DE REDES ÓPTICAS.

La simulación es un procedimiento que permite sustituir las situaciones reales por otras creadas artificialmente como abstracciones del sistema real, con el fin de alcanzar una mejor comprensión de conceptos de una situación estudiada. La simulación permite controlar muchas variables del sistema, con el objetivo de obtener una diversidad de resultados que sean interpretados y analizados.

Una gran parte de la ciencia, hoy en día, basa sus éxitos cada vez más en el paradigma de la simulación, más que en la experimentación en sí. Debido a que, la simulación brinda la información del proceso a realizar y permite obtener y aprender acciones y habilidades necesarias para que, al realizar la experimentación, se pueda transferir con igual efectividad. La simulación mediante software en el campo de redes de telecomunicaciones es actualmente una herramienta muy útil para empresas y universidades del sector a la hora de recrear el comportamiento de un sistema en el cual se estén ejecutando diferentes servicios definidos por el usuario. Existen multitudes de simuladores, la elección depende de varios factores tales como: los protocolos soportados, cantidad de eventos que puede simular, la facilidad de uso y la flexibilidad.

El primer paso para el monitoreo y análisis del comportamiento de la red, es la elección de una herramienta software de simulación que permita realizar un determinado escenario de red, para así llevar a cabo de manera satisfactoria el desarrollo de los objetivos propuestos para este trabajo de grado. En la simulación se tiene en cuenta, la estructura (topología) de la red y el tráfico que posee la misma, con el fin de crear una especie de diagnóstico, que muestre el comportamiento que se obtiene al definir ciertas características [18].

3.2.1. Herramienta Software de Simulación.

La herramienta de simulación permite analizar el funcionamiento de la red característica, al evaluar el desempeño a nivel físico de la red FTTH-GPON, al integrar el módulo RoF, con base en los parámetros de Monitoreo de Desempeño Óptico (OPM) mediante los escenarios de simulación que permitan desarrollar los objetivos propuestos. Para cumplir con esto, se analizaron las principales herramientas de simulación nombradas en el estado del arte para determinar cuál es la que mejor se adapta al proyecto propuesto, a continuación se exponen de manera general cada una de ellas.

➤ VPItransmissionMaker™ WDM

VPItransmissionMaker™ WDM es una herramienta de VPIsystems, Inc. que permite el diseño avanzado de sistemas incluyendo novedosos esquemas de modulación, compensación de la *PMD*, amplificación RAMAN, regeneración parcial, compensación de dispersión adaptativa y *OCM*. La interfaz gráfica permite que casi cualquier topología sea construida y simulada usando los modos “sample” (“muestra”) y “block” (“bloque”), en simulaciones tanto unidireccionales como bidireccionales. Representaciones avanzadas de múltiples señales y sofisticados modelos numéricos aseguran velocidad y precisión. Entre las aplicaciones de esta herramienta se encuentran: comparación de las estrategias de actualizaciones para *DWDM* con sistemas de altas velocidades de transmisión de datos, selección de tecnologías para redes metropolitanas WDM y redes de acceso digital, evaluación de diafonía en redes metropolitanas WDM super densas, entre otras [40]

➤ OptiSystem

System Design Software, Optiwave Systems Inc. introduce OptiSystem, 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, incluyendo Óptica de Espacio Libre (*FSO*, *Free Space Optics*) y la aplicación de Radio sobre Fibra (RoF, *Radio over Fiber*) para el diseño de redes inalámbricas en malla [41].

OptiSystem es una herramienta software de diseño de redes ópticas poderosa, novedosa y de rápida evolución 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. Además, esta herramienta presenta de una manera visual el análisis de escenarios [42].

➤ **MATLAB**

Es una herramienta software matemática que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio que está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux. Entre sus prestaciones están: 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. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones: Simulink (*plataforma de simulación multidominio*) y GUIDE (editor de interfaces de usuario). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (*toolboxes*); y las de Simulink con los paquetes de bloques (*blocksets*). Es muy útil para la modelación y simulación de sistemas, entre los cuales están los de telecomunicaciones con sus respectivas cajas de herramientas sofisticadas [43].

➤ **OptSim.**

RSoft desarrolla la herramienta OptSim la cual brinda un ambiente de modelamiento intuitivo para el diseño y simulación de sistemas de comunicaciones ópticas. Los algoritmos propietarios en el dominio del tiempo y de la frecuencia de OptSim, permiten la simulación de sistemas complejos con un alto grado de eficiencia y precisión. Las aplicaciones de OptSim incluyen: DWDM/CWDM, RoF, FSO, Redes Totalmente Ópticas (AON, *All-Optical Networks*), Redes de Área Local (LAN, *Local Area Networks*) ópticas, interconexiones ópticas, sistemas soliton, simulación extensiva de sistemas multimodo, entre otras.

OptSim® es un software de la compañía *Synopsis, Inc*, que proporciona un paquete de simulación de sistemas de comunicaciones ópticas como WDM, TDM, CATV, PON y otros sistemas ópticos para múltiples aplicaciones, además permite diseñar y simular sistemas ópticos para evaluar su desempeño de acuerdo a varios parámetros determinados.

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. Al igual que en un sistema óptico real, la señal de datos es transportada entre los componentes que hacen parte de la simulación en OptSim®. Cada bloque o componente es simulado de manera independiente con base en los parámetros especificados por el usuario para 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.

OptSim® proporciona una extensa librería con los componentes más comúnmente utilizados en sistemas de comunicaciones ópticas y se organizan en varias categorías como: Generadores de señal, transmisores, Fibras Ópticas, Filtros (ópticos y eléctricos), multiplexores y demultiplexores, amplificadores (ópticos y eléctricos), receptores, entre otras. 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. Además, para la utilización de todas sus funcionalidades, esta herramienta proporciona un entorno de trabajo conformado por una GUI que permite una interacción más sencilla con el usuario, facilitando el diseño de los sistemas ópticos y el análisis de los resultados que se producen a partir de su simulación [44]. Una característica de gran importancia que tiene la herramienta de simulación es que, por

una parte, cuenta con una extensa librería de componentes para el diseño y modelamiento de aplicaciones como *CATV* analógico y *CATV* Digital (con base en modulaciones *PSK*, *M-QAM*, etc.); por otra parte, incluye dos redes básicas FTTH-PON con soporte de servicios de datos, VoIP y video ya diseñadas con sus respectivos nodos o módulos como lo es el ONT y el OLT, que permiten ser una referencia para la implementación de las topologías de red que proporcionen estos servicios y así evaluar el desempeño óptico [45].

Las características expuestas anteriormente son adecuadas para el desarrollo de este trabajo de grado, además la Facultad de Ingeniería electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca facilita esta herramienta de simulación ya que cuenta con la licencia para su utilización, por tal razón, esta herramienta ha sido seleccionada.

Un aspecto importante que caracteriza a OptSim® es la utilización de una doble máquina de simulación, definiendo dos modos de simulación, modo bloque y modo muestra:

-Modo Bloque: en este modo se realizan simulaciones en las que la señal de datos pasada entre los componentes representa el tiempo total simulado en un bloque de datos. Dicho de otra manera, en este modo un único componente puede pasar datos únicamente a otro componente una vez durante el curso de la simulación, cubriendo el tiempo simulado en un solo bloque de datos.

-Modo Muestra: en este modo se realizan las simulaciones de tal manera que la señal de datos pasada entre los componentes representa una única muestra en cada instante de tiempo. A diferencia del modo bloque, en este modo un componente pasará nuevas muestras de datos a otro componente a cada paso de tiempo en la simulación, además la simulación puede ejecutarse sobre una cantidad ilimitada de tiempo.

Adicionalmente, el modo muestra presenta dos tipos de simulación:

-La técnica de simulación de ancho de banda variable (*VBS*, *Variable Bandwidth Simulation*) que define un entorno donde las señales se propagan como muestras en el dominio del tiempo sobre un ancho de banda variable y permite determinar el comportamiento de la señal en recepción. Además, presenta diferentes opciones de simulación: "*VBS Loss Only Fiber*", que solo tiene en cuenta la atenuación de la fibra, "*VBS Linear Fiber*", que solo considera los efectos lineales y "*Full VBS*", caracterizada por ser la opción más completa para realizar la simulación ya que tiene en cuenta todos los efectos de la fibra, por consiguiente, implica que los resultados de la simulación tengan un nivel más cercano a la realidad.

-La técnica de propagación espectral (*SPT*, *Spectral Propagation Technique*) que se realiza en el dominio de la frecuencia, donde las señales se propagan en la red como espectros de potencia, tomando en cuenta las pérdidas y el ruido de los componentes. De esta manera, el espectro y los niveles de potencia pueden evaluarse en cualquier punto de la red [44] [45].

Además, la herramienta se compone de un modo de análisis donde se puede observar el comportamiento del sistema a partir de graficas analíticas.

Para el desarrollo del trabajo de grado, se adoptó el modo muestra, ya que provee una red de referencia FTTH-PON con soporte de servicios *Triple Play*, con parámetros establecidos por defecto por parte de la herramienta. El modo muestra provee una red con soporte de Internet, VoIP y *CATV* Digital que por medio de sus

componentes de medida y análisis, permite estudiar los parámetros que determinan el desempeño en estos servicios de carácter digital.

Dentro del estado del arte realizado se encontraron algunas herramientas que trabajan la arquitectura RoF y redes ópticas, las consideradas fueron: Matlab, VPItransmissionMaker™ WDM, Optisystem y OptSim. En concordancia con los objetivos del presente trabajo de grado 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, además que es una herramienta amigable, fácil de estudiar y manejar en poco tiempo, soporte técnico por parte de Rsoft entre otras características que ya se nombraron.

3.3. DISEÑO DE LA SIMULACIÓN CON LA HERRAMIENTA SOFTWARE OptSim.

Teniendo como referencia la metodología descrita anteriormente y la que se propone en [39] y [46], Para el diseño de la simulación se debe tener en cuenta que actualmente la Universidad del Cauca dispone a licencia correspondiente al software OptSim. Para la obtención de los modelos de desempeño y simulación se siguen en general los siguientes pasos, con base en la adaptación de la metodología propuesta:

1. Definición de los escenarios de prueba.
2. Obtención de las redes de prueba (Modelos Lógico y Físico).
3. Diseño del módulo RoF
4. Prueba de la red FTTH-GPON *Triple Play* (sin RoF).
5. Prueba del módulo RoF.
6. Prueba de la red integrada FTTH-GPON *Quad Play* (con RoF).
7. Comparación de resultados.
8. Conclusiones.

Al aplicar estos pasos generales por ejemplo a un solo escenario es posible obtener un conjunto de modelos de simulación para cada tipo de estudio de caso.

Para guiar el estudio de evaluación del desempeño de los diferentes escenarios propuestos se acude a la metodología propuesta, donde se muestra como un estudio de evaluación de desempeño soportado en simulación y contiene una serie de pasos. El diseño de la simulación se muestra en la figura 3.1 a través de un diagrama de flujo general.

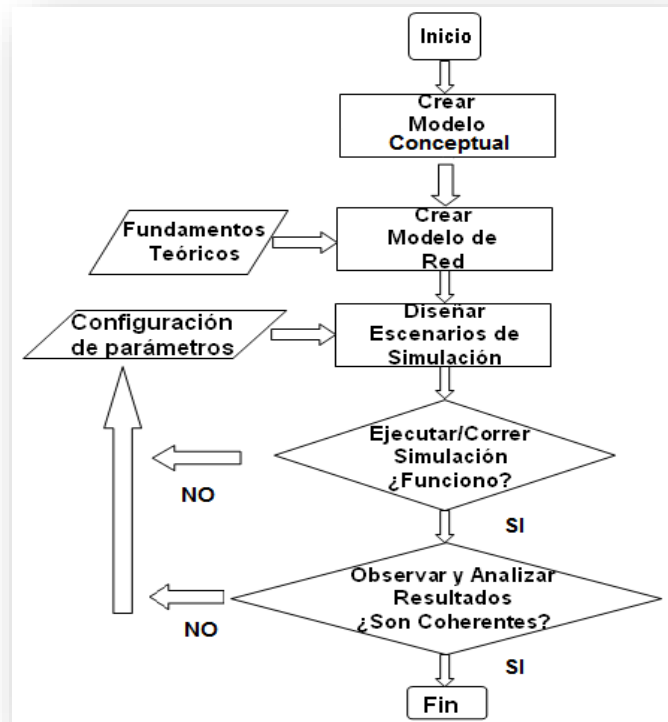


Figura 3.1 Diseño de la Simulación

3.4. DEFINICIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL.

La red característica que permita obtener los resultados y dar cumplimiento a los objetivos planteados en este proyecto, se termina de definir en este capítulo, como un modelo (abstracción de la realidad) en OptSim, el cual permite realizar la evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF. El modelo está compuesto por una Red FTTH-GPON que soporta servicios *Triple Play* a la cual se le va a añadir el módulo RoF y así poder contar con servicios *Quad Play*. 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 los objetivos propuestos.

De acuerdo al diseño de la simulación, el primer paso es crear un modelo conceptual. Como la metodología va de lo general a lo específico, en seguida se muestra un esquema general del modelo (figura 3.2) y un esquema general de un enlace con multiplexación (figura 3.3).

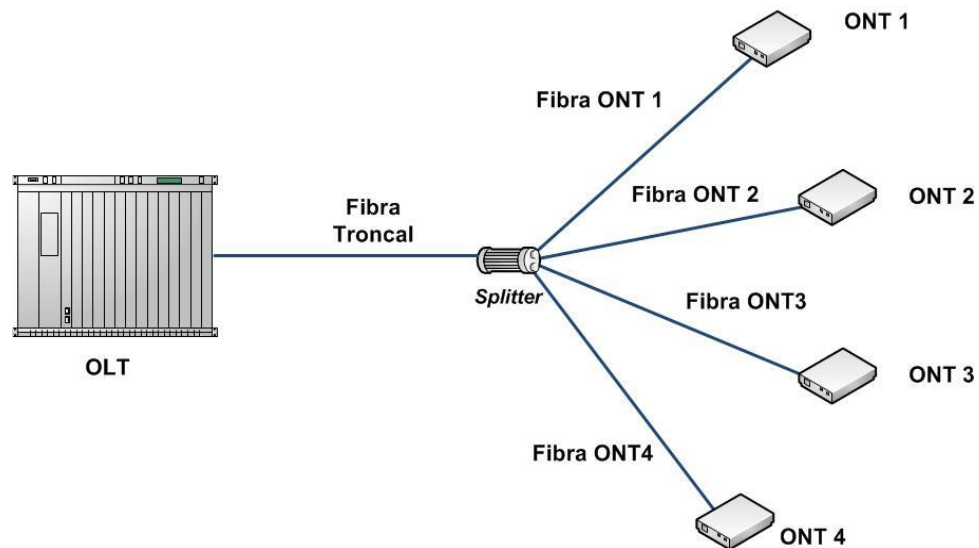


Figura 3.2 Escenario General.

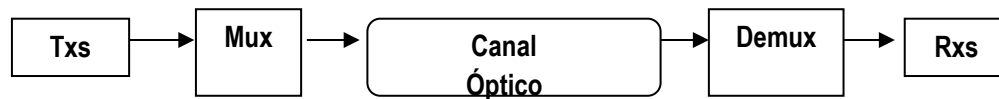


Figura 3.3 Esquema General de un Enlace con Multiplexación [18].

En la figura 3.4 se muestra en diagrama de bloques del transmisor de la red FTTH/GPON *Triple Play* sin el módulo RoF el cual está acorde a lo propuesto en [44], mientras que en la figura 3.5 la misma red con el bloque RoF, dicho modulo se propone según el estudio realizado en el estado del arte y el capítulo dos como también en concordancia con lo que se propone en [5] [10] [13] [16] [25] [31].

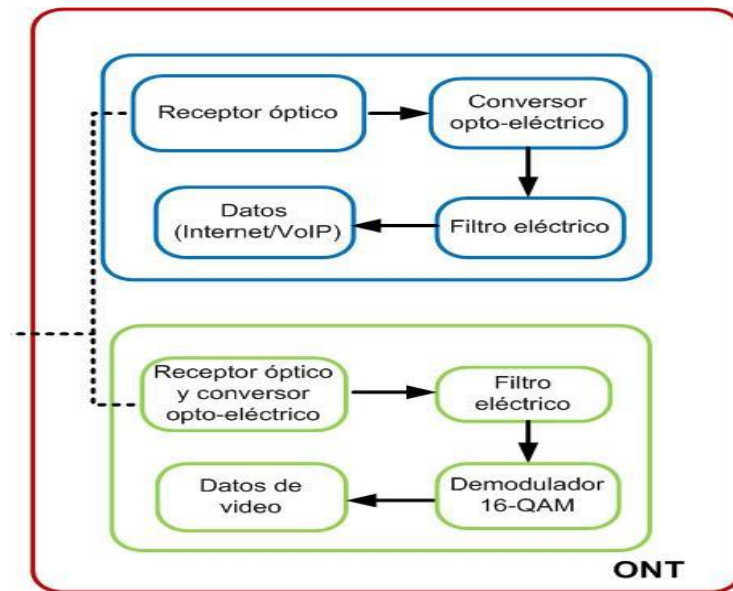


Figura 3.4 Modelo General de Red sin Módulo RoF [44].

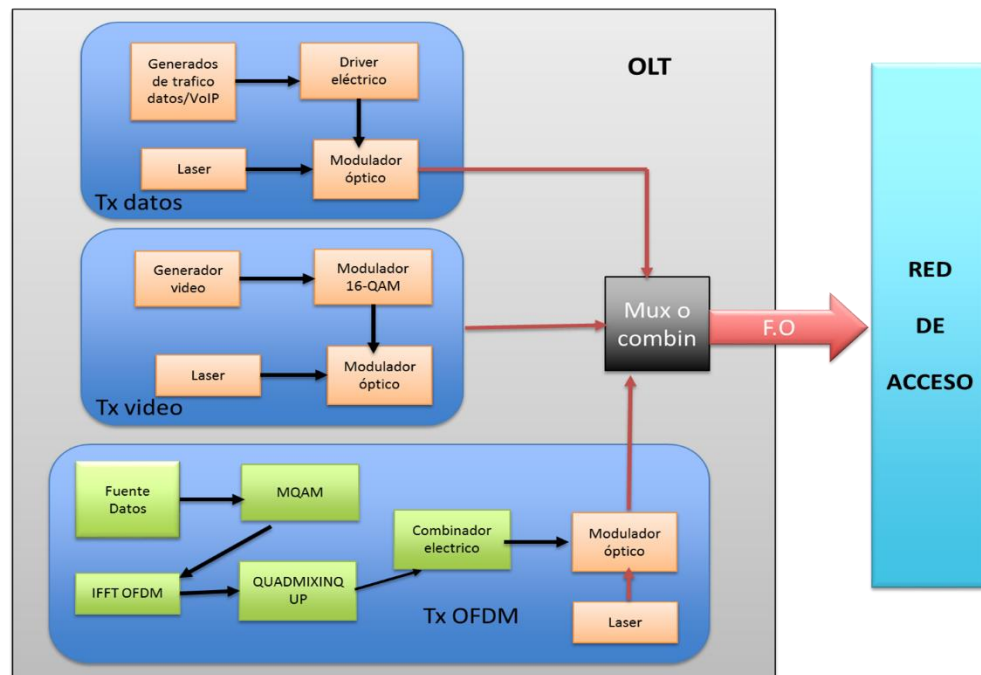


Figura 3.5 Modelo General del Transmisor de la Red con el Módulo RoF.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

A continuación, se define gráficamente el modelo conceptual a través de las figura 3.6, se procede a especificar cada uno de los módulos mostrados anteriormente desde la figura 3.2 a 3.5

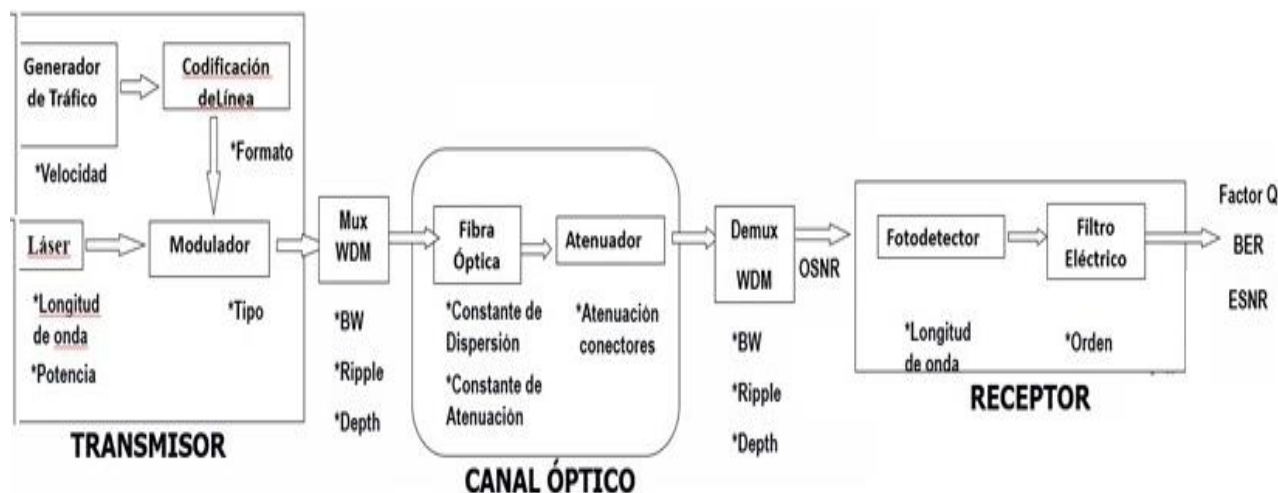


Figura 3.6 Modelo Conceptual.

Tomando como referencia los resultados de [44], desarrollada al interior del departamento de telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, se toma el mejor escenario de dicha tesis el cual consiste en una topología en árbol con la configuración de CATV digital, al cual en dicho trabajo de grado de le denomino caso de estudio 1. A continuación, se describe dicho caso de manera general.

3.4.1. Descripción General Modelo Conceptual de la Red FTTH-GPON

Caso de Estudio No.1. Transmisión de Internet/VoIP y CATV Digital

En este caso, el servicio *Triple Play* es proporcionado como una combinación de señales de Internet, VoIP y CATV Digital. El componente de Internet y VoIP se trabajan de manera conjunta a una velocidad de 1.25 Gbps (velocidad máxima para un enlace GEPON) y se transmiten en la longitud de onda de 1490 nm. Por su parte, el componente de video es representado como un sistema SCM Digital 16 QAM que se transmite en una longitud de onda de 1550 nm [44].

➤ Topología de Red en Árbol

El proceso de configuración de la topología en árbol, se realiza con la variable cobertura, la cual está en función de la longitud de la fibra troncal y la fibra que se despliega desde el *splitter* hasta la ONT, en la figura 3.7 se muestra el modelo general de dicha red.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

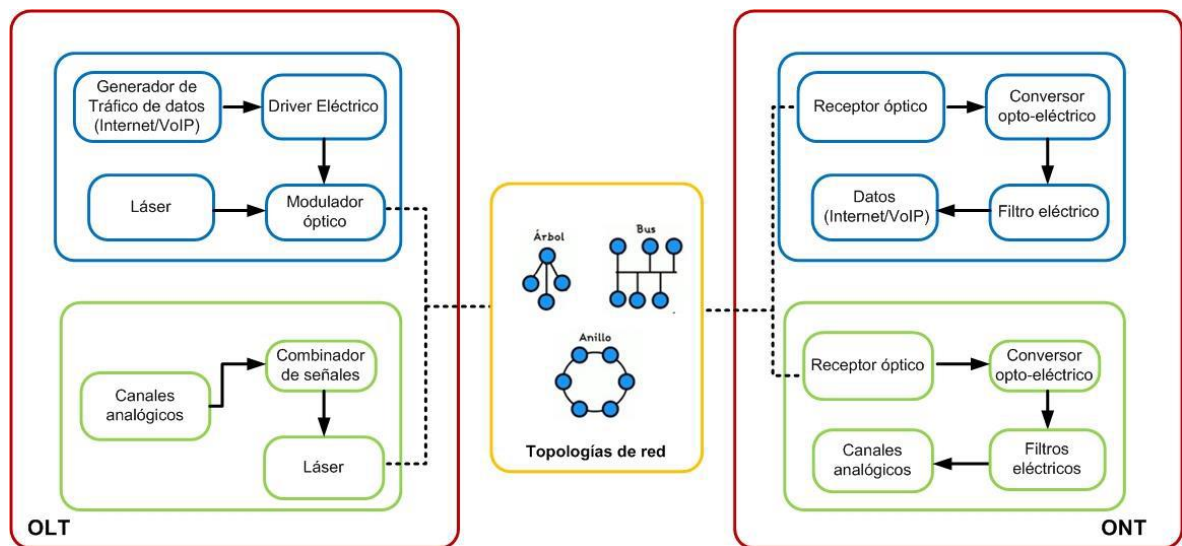


Figura 3.7. Red FTTH-GPON PROPUESTA EN [44].

Teniendo en cuenta los modelos propuestos en [44] y [47], a continuación, se detallan las características y los valores que se proponen en los parámetros de las figuras previas tras un proceso de configuración de manera generalizada, ya que más adelante se detallaran los parámetros de configuración con los que se simulará.

➤ **Subsistema de Transmisión:**

✚ **Láser:**

- *Tipo:* Láser de Onda Continua.
- *Longitud de Onda:* desde 1291 nm hasta 1591 nm.
- *Potencia:* 0 dBm Datos, 8dBm para video.

✚ **Generador de Tráfico:**

- *Velocidad de Transmisión de Datos:* 0.8 Gbps video y 2.5 Gbps datos.

✚ **Codificación Línea:**

- *Formato:* No Retorno a Cero (NRZ, *Non Return to Zero*).

✚ **Modulador:**

- *Tipo:* externo (Mach- Zehnder⁴).

➤ **Subsistema Multiplexor/Demultiplexor WDM:**

- **Filtro Óptico:** Las pérdidas adicionales del filtro para cada canal se denominan rizado.

⁴ Tipo de modulador externo comúnmente empleado en redes WDM.

- *Tipo*: Bessel.
- *Orden*: 2.
- *BW*: equivalente a cuatro veces la velocidad de transmisión de datos. (Valor= 3.2 GHz, para 0.8 Gbps, Valor= 5 GHz, para 1.25 Gbps, Valor= 10 GHz, para 2.5 Gbps).
- *Profundidad*: atenuación que presenta el filtro para todos los canales, excepto para el que le corresponde. (Valor = 100).

➤ **Subsistema de Canal Óptico:**

✚ **Fibra Óptica:**

- *Tipo*: SMF-28 (ITU-T G.652)⁵
- *Constante de Atenuación*: es una función de la longitud de onda y del tipo de fibra.
- *Constante de Dispersión*: es una función de la longitud de onda y del tipo de fibra.

✚ **Atenuador:**

- *Atenuación de los conectores de la fibra*: 1 dB.

➤ **Subsistema de Recepción:**

✚ **Fotodetector:**

- *Tipo*: PIN.
- *Longitud de Onda*: desde 1291 nm hasta 1591 nm, correspondiendo con la utilizada por el láser.

✚ **Filtro Eléctrico:**

- *Tipo*: Buterworth.
- *Orden*: 16.

3.4.2. Diseño conceptual del módulo de radio frecuencia sobre fibra óptica RoF.

Teniendo en cuenta el marco teórico de radio sobre fibra expuesto en el capítulo dos sobre la arquitectura de radio sobre fibra, un diagrama generalizado del módulo de RoF, son los que se muestran en las figuras 3.8 y 3.9.

⁵ Las fibras ópticas SMF-28 corresponden a nombres propios definidos por el proveedor Corning.

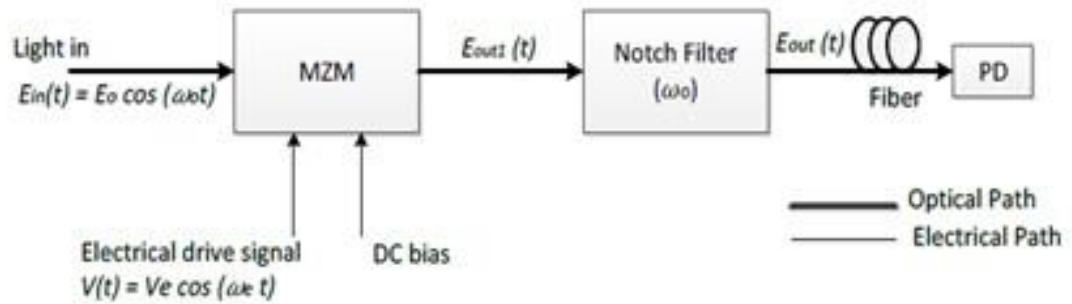


Figura 3.8 Diagrama del sistema de generación de la señal de microondas/milimétrica [31].

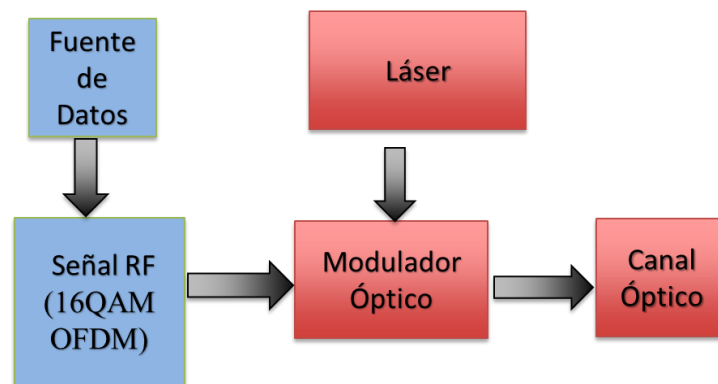


Figura 3.9 Diagrama general del sistema de radio/fibra.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

- **Fuente de datos:** es una señal de tipo aleatoria tal y como lo propone el manual de OptSim, la velocidad de transmisión es a 10Gbps.
- **Señal eléctrica de RF:** en este módulo se hace todo el tratamiento de la señal en cuanto a codificación, modulación, así mismo se monta la señal ya modulada QAM sobre portadoras OFDM y se pasa a RF antes de entrar al medio óptico.
- **Modulador óptico:** para el desarrollo de este trabajo se utilizará la modulación externa ya que según el estado del arte ella se comporta mucho mejor que la modulación directa a frecuencias mayores de los 5 GHz; para ello se propone utilizar el modulador externo Mach-Zehnder, el modulador en fase MZ o el interferómetro MZ.

Algunas de las características de la modulación externa son [16]:

- Aumentar ancho banda: 40 Ghz.
- Trabajo a tasas más altas, menor distorsión señal.
- Corrige el problema distorsión de la modulación directa

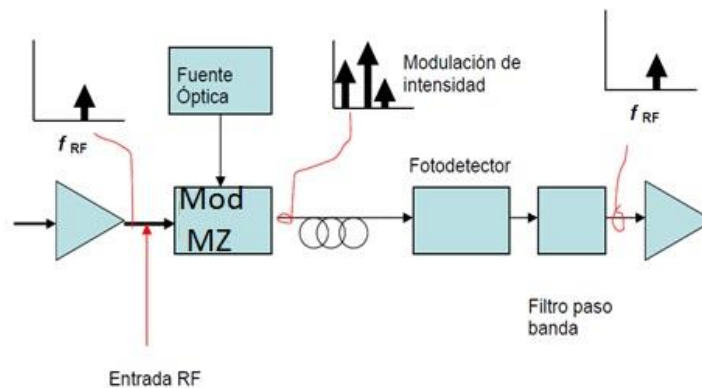


Figura 3.10 Modulación Externa [31].

➤ Tipos de Láser y su Escogencia:

Existen dos tipos de láser: DML y EML. Los DML manejan un chirp positivo, mientras los EML se les puede variar el parámetro α de valores positivos a negativos y así modificar el valor del chirp para obtener un mejor desempeño. Por lo anterior, los láser modulados internamente tienen un mejor comportamiento con la fibra *CorningLEAF* ya que esta fibra tiene una dispersión negativa, y si se desea trabajar con los modulados externamente se varía el parámetro α de tal forma que se obtenga un chirp positivo y también se tendrá un buen comportamiento, aunque para el caso de estos últimos láser, la SMF-28 tiene un mejor desempeño para distancias pequeñas (hasta 50 Km) lo anterior según lo expuesto en [18].

En conclusión, se obtiene un mejor comportamiento al usar fibras de dispersión negativa en conjunto con DML, y fibras de dispersión positiva con EML.

Por tanto para la simulación se escogió láser de tipo EML ya que tienen un buen comportamiento tanto con fibras de dispersión negativa como de dispersión positiva, debido a que los escenarios de simulación varían en cuanto las distancias del trayecto y los resultados obtenidos se van a comparar, se deben hacer los enlaces con las mismas condiciones. Además, los láseres de tipo DML son adecuados solamente para velocidades de transmisión de datos de 0.8 Gbps, 1.25 Gbps, y 2.5 Gbps, y son limitados para utilizarse a velocidades superiores a 10 Gbps, porque el chirp inducido los afecta al ser modulados de forma directa. Por lo anterior, se recomienda el uso de EML, tanto para 0.8 Gbps, 1.25 Gbps, 2.5 Gbps, 10 Gbps y 40 Gbps.

3.5. DEFINICIÓN DEL MODELO DE RED EN EL ENTORNO DE SIMULACIÓN (OptSim).

Como se ha venido trabajando en este trabajo de grado, a continuación, se define el modelo de red sobre el cual se desarrollan las simulaciones, que consiste en una red con topología en árbol, ya que según [marcillo] esta presenta un mejor desempeño en una red FTTH/GPON *Triple Play*.

Cabe aclarar que el modelo mostrado en la figura 3.11 fue tomado del ejemplo que trae por defecto la herramienta de simulación OptSim y se le configuró los parámetros propuestos en [44] para obtener los resultados de su trabajo y a partir de este escenario base, se inicia a armar el que permitirá lograr los objetivos de este trabajo de grado.

En la tabla 3.1 que se muestra a continuación se resumen los parámetros que se utilizaran para la simulación de los escenarios:

Para la red mostrada en la figura 3.11 con los parámetros de la tabla 3.1 se analizaron de manera general los parámetros de desempeño en el receptor para verificar que realmente la red está funcionando correctamente, para la señal de datos se tiene un buen comportamiento tal y como lo muestra la figura 3.14 a, pero en el caso de la señal de video se tiene una BER de 10^{-3} , el cual no cumple con las condiciones mínimas del estándar MPEG-2, para ello fue necesario realizar la configuración propuesta en [47], en el cual se mejora la señal de video obteniendo una BER de 10^{-7} , cumpliendo de esta manera las condiciones mínimas del estándar MPEG-2, dicha configuración se observa en la figura 3.12

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

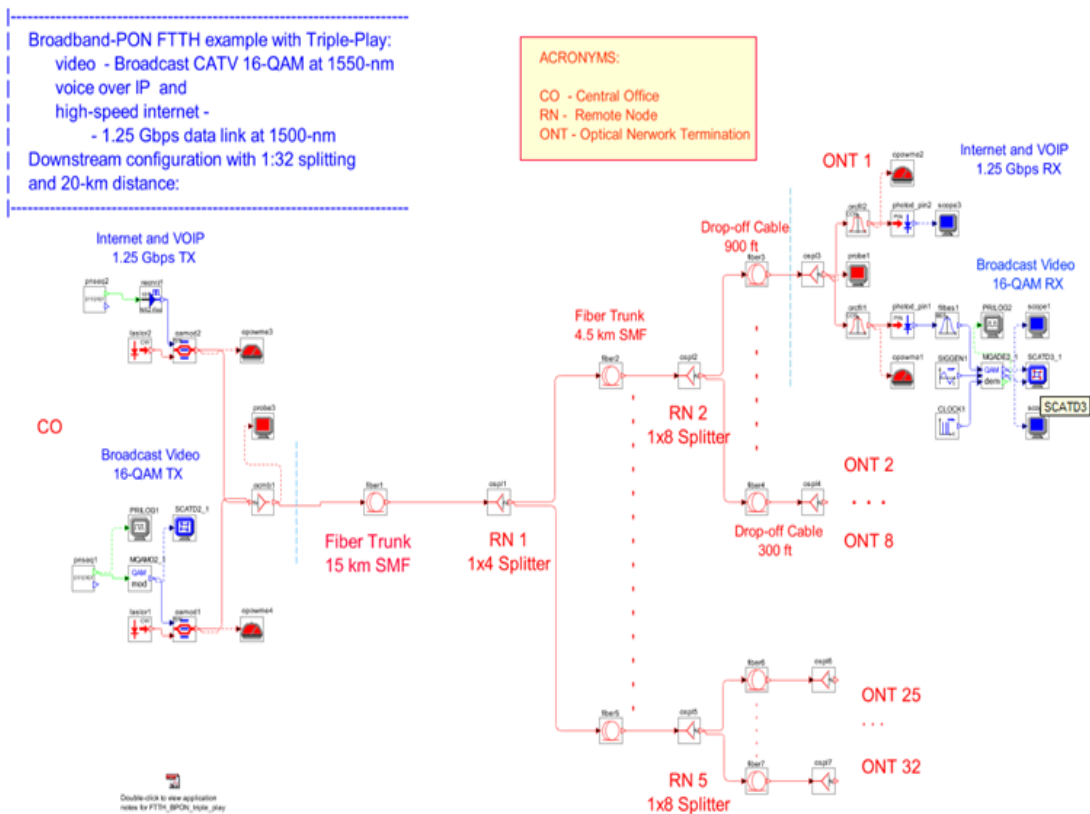


Figura 3.11 Modelo General de la Red FTTH-GPON *Triple Play* [45].

Tabla 3.1 Parámetros técnicos establecidos para la implementación y simulación.

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

Andrés Felipe Escallón Portilla

87

Víctor Hugo Ruiz Guachetá

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

SERVICIO DE CATV DIGITAL	
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

*Velocidad de transmisión de 0.8 Gbps, definida por defecto en la herramienta de simulación. Esta velocidad resulta de la utilización del formato MPEG-2 para la transmisión de televisión digital con modulación 16-QAM, cuya velocidad por usuario es de 0.025 Gbps [18]; teniendo en cuenta que la cantidad máxima en una red FTTH-GEPON es de 32 usuarios, la velocidad sugerida es de 0.8 Gbps.

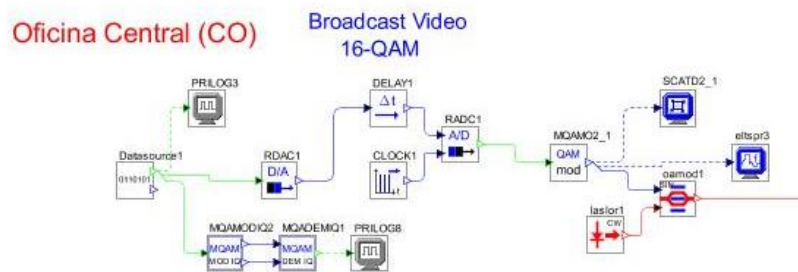


Figura 3.12 Configuración de la señal de video mejorada.

En la figura 3.13 se observa ya la configuración de la red FTTH-GPON con la parte modificada del video y el la figura 3.14 se observan los diagramas de ojo de cada servicio en donde cumplen las condiciones para una buena recuperación de la señal.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

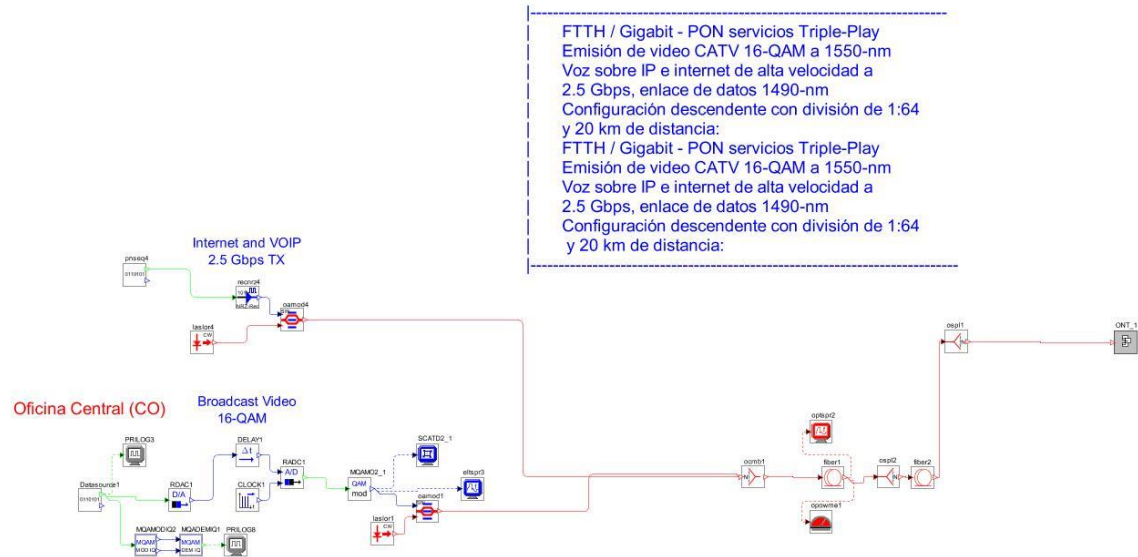


Figura 3.13 Modelo General de la Red FTTH-GPON *Triple Play* 10NT con el video mejorado.

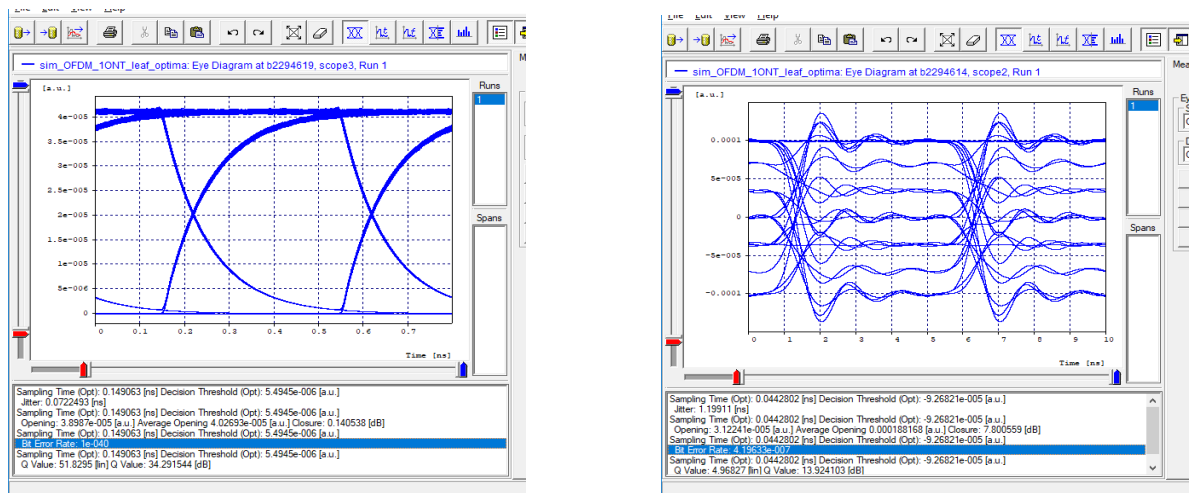


Figura 3.14 Parámetros de desempeño red FTTH-GPON *Triple Play*: a) Diagrama del ojo señal de datos. b) Diagrama del ojo señal de video.

El proceso de análisis y diseño del módulo RoF que permita conseguir los servicios *Quad Play* he integrarlo a la red FTTH-GPON ha sido con base en la metodología. A continuación, se muestran las gráficas que describen los pasos a paso.

3.5.1. Diseño del Módulo RoF.

Para diseñar el módulo RoF el cual es uno de los objetivos específicos de este trabajo, después de explorar la herramienta OptSim y verificar que tenía esta acerca de radio frecuencia se encontraron varios diseños de radio sobre fibra, tanto en modulación directa como externa, pero se decidió tomar como referencia para el diseño del módulo de RF el sistema OFDM radio sobre fibra usando la modulación en fase. La razón por la que se decidió trabajar con este tipo de ejemplo propuesto en la herramienta es por el análisis realizado en el estado del arte en donde se proponen vario módulos de RoF en diferentes herramientas de simulación entre ellas OptSim y Matlab en todos ellos proponen la modulación 16QAM sobre portadoras OFDM, tal y como se exponen en [7] [8] [9] [15] [16] [31] entre otros artículos, ya que bajo estas consideraciones que propone cada autor se logra obtener una mayor distancia en un enlace punto a punto y un mejor desempeño en cuanto a los parámetros físicos de la red; a continuación se describe dicho modulo y se los cambios que se le realizaron para poder ser integrado a la red FTTH-GPON

➤ Sistema OFDM radio sobre fibra usando modulación en fase.

Este ejemplo muestra una red RoF, el cual se compone de un transmisor OFDM, tal y como lo muestra la figura 3.15, cuya señal de salida está en radio frecuencia. Esta señal es modulada en fase a través del modulador óptico en fase y el láser, cuya señal de salida está totalmente en el dominio óptico; esta señal entra al canal óptico el cual tiene una fibra mono modo estándar de 3 Km de longitud. En el lado de la recepción se hace el proceso contrario al de transmisión, el cual cuenta con un receptor OFDM tal y como lo muestra la figura 3.16 a y b.

La modulación OFDM utiliza portadoras ortogonales para transportar la información de múltiples secuencias de bits de baja velocidad moduladas usando BPSK, QPSK o QAM (para el caso del proyecto se utiliza 16QAM). Se pasa de serial a paralelo y las conversiones de paralelo a serie permiten transmitir y recibir un solo flujo de bits de alta velocidad. Los modelos de modulación OFDM OptSim son varios bloques discretos que se pueden configurar a voluntad con filtros y fuentes de ruido para simular configuraciones de sistema OFDM realistas. Además, la señal puede monitorearse en cada etapa de la modulación y del proceso, haciéndolos ideales para estudiar los detalles de comportamiento de modulación. OptSim incluye los componentes compuestos de transmisor y receptor OFDM disponibles en la muestra. Una mayor descripción de cada uno de estos módulos propios de la herramienta OptSim consultar los manuales en [45].

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

OFDM Radio-over-Fiber transmission using phase modulation

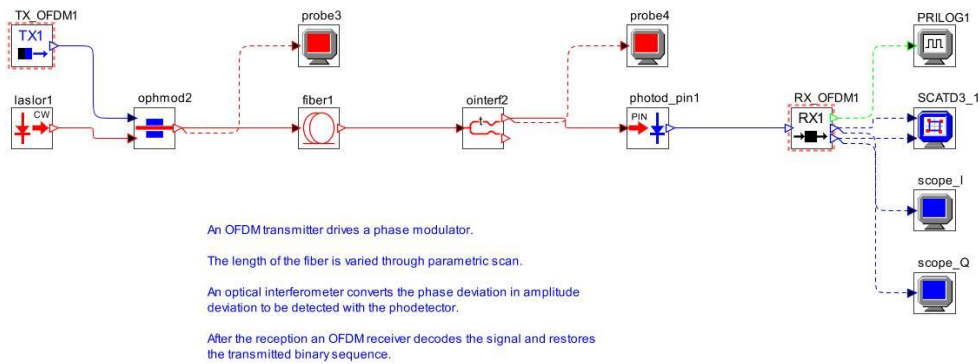


Figura 3.15 Sistema de Radio sobre fibra óptica utilizando modulación en fase.

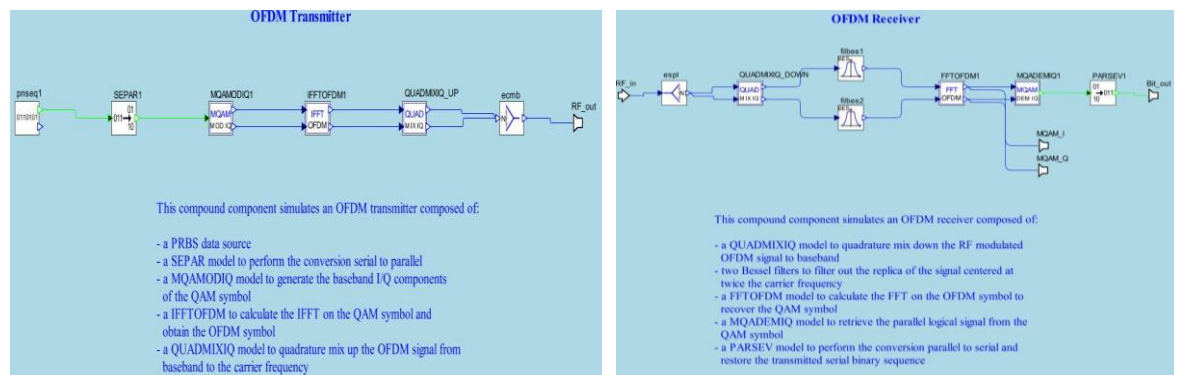


Figura 3.16 a) Transmisor OFDM. b) Receptor OFDM [48].

La figura 3.17 muestra la red OFDM back-to-back el cual permitirá hacer más adelante una comparación de la señal cuando entra a medio de transmisión, que en este caso es la fibra óptica.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

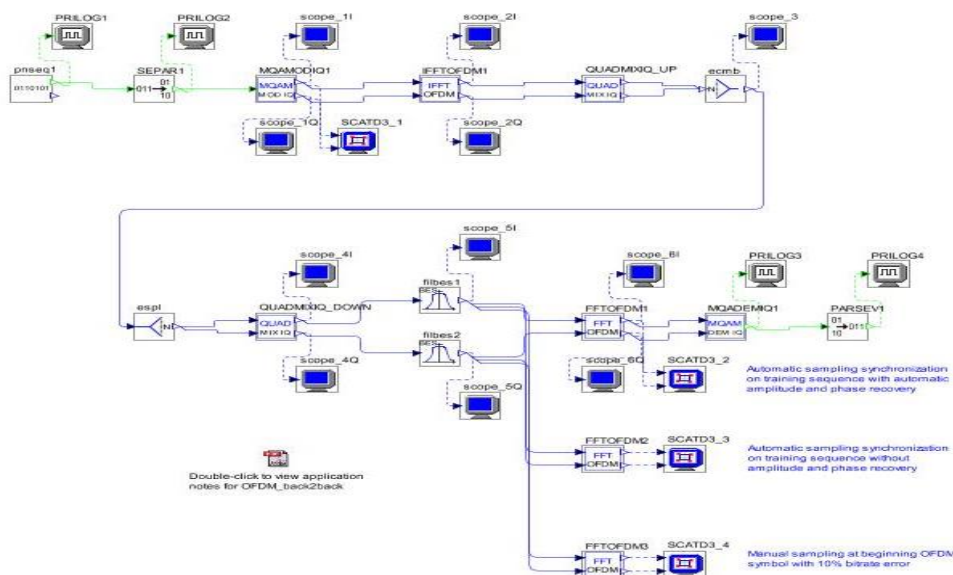
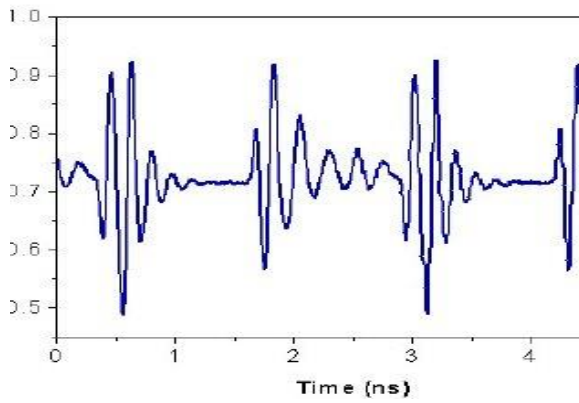


Figura 3.17 Módulo OFDM back-to-back.

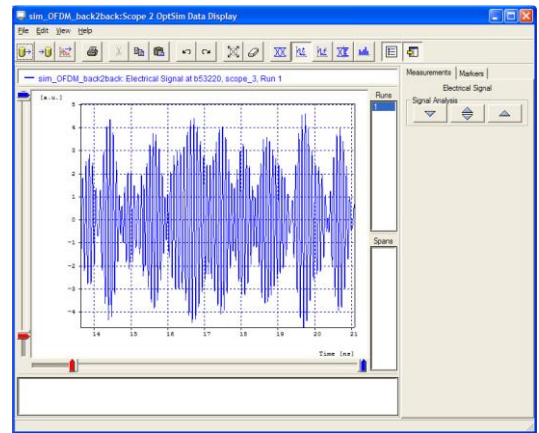
A continuación, se procede a realizar una comparación entre los resultados teóricos y simulados respecto a OFDM RoF, lo cual permite justificar la relevancia del escenario propuesto, es de aclarar que la configuración propuesta en la figura 3.15 propuesta por defecto en la herramienta OptSim para la distancia de 3Km no presentaba un buen desempeño ya que el diagrama de constelaciones del lado del receptor no correspondía al back to back, es decir se estaba perdiendo información, la BER era muy alta, se varió la distancia y solo se pudo apreciar dicha constelación entre lo teórico y lo simulado con una distancia de 300 metros tal y como lo muestra la figura 3.18.

Teniendo en cuenta que los objetivos planteados en este trabajo se enfocan en redes de acceso FTTH cuya distancia oscila entre los 100 m y 3 Km, fue necesario rediseñar el módulo de RoF propuesto por OptSim, para ello se hizo una consulta a la mesa de ayuda de Rsoft, en un correo proponen que se cambie el tipo de modulación óptica, que no se utilice el modulador en fase lineal sino que se utilice el modulador de electro absorción lineal y según lo estudiado diferentes artículos del estado del arte entre ellos [7] [31] [16], el modulador de electro absorción presenta un mejor desempeño que el de fase cuando se requiere alcanzar mayor distancia. De esta manera y cambiando el tipo de fibra óptica (la estándar SMF-28 por la *CorningLEAF*) se obtiene un mejor desempeño y se alcanza una distancia máxima de 5,860Km, logrando las mismas gráficas mostradas en la figura 3.18.

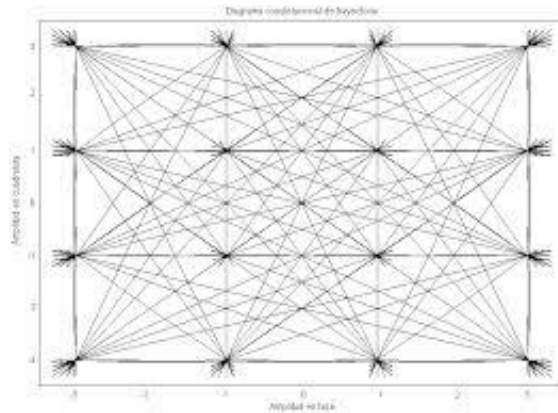
Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF



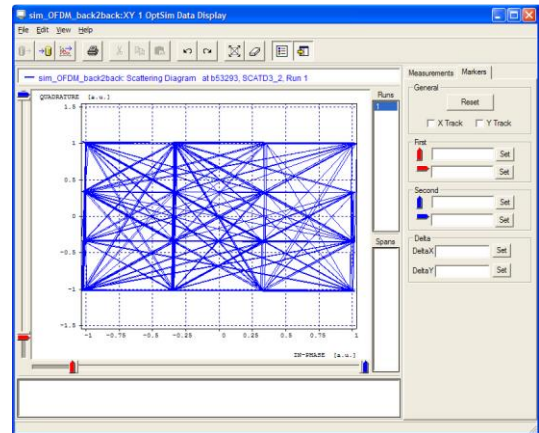
a)



b)



c)



d)

Figura 3.18 a) Señal teórica de OFDM RF-modulada. b) Señal simulada de OFDM RF-modulada. c) Diagrama teórico de constelación 16-QAM. d) Diagrama simulado de constelación 16-QAM.

Por tanto, la configuración del módulo de RoF queda según se muestra en la figura 3.19.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

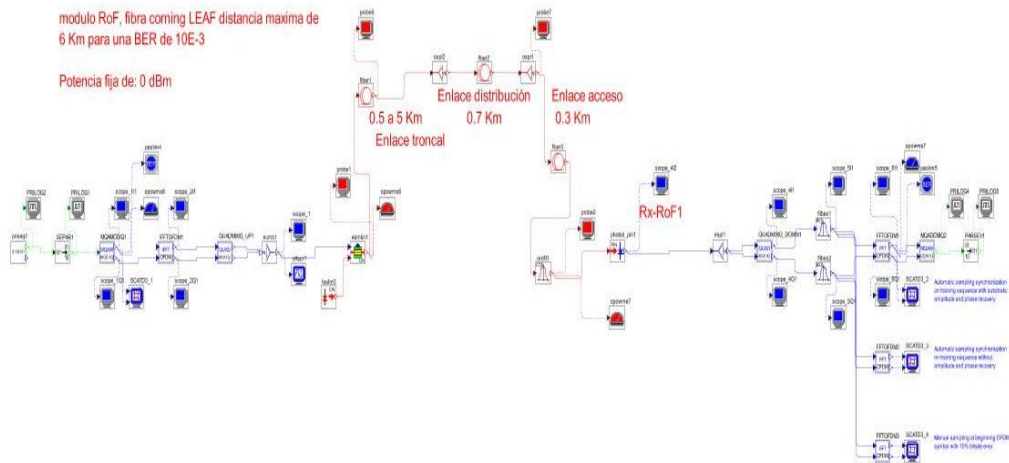


Figura 3.19 Modulo de RoF para una ONT.

Una vez verificado que realmente la red ejemplo de OptSim coincide con lo estudiado en el estado del arte y la teoría, se procede a integrar el módulo de radio frecuencia a la red FTTH/GPON *Triple Play* y de esta manera se estaría introduciendo el cuarto servicio (señal OFDM), quedando así el escenario de simulación a analizar. En la figura 3.20 se puede apreciar la red propuesta.

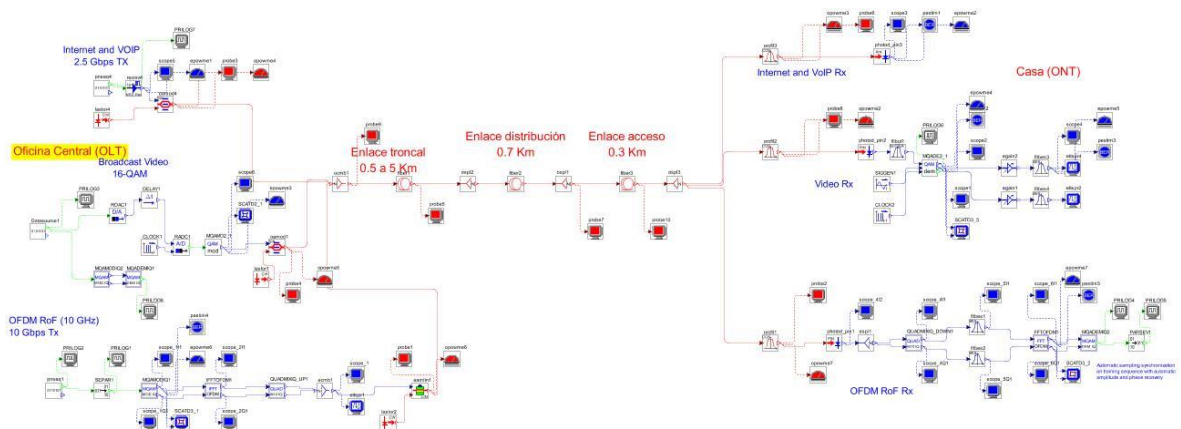


Figura 3.20 Red FTTH-GPON con el módulo RoF integrado.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

Los parámetros de configuración del Módulo RoF son los que se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Parámetros de configuración módulo RoF

PARÁMETRO	VALOR
Velocidad de transmisión	10Gbps
Modulación 16QAM	2.5 Gbaud/s amplitud 1 AU
<i>Módulo IFTT-OFDM</i>	
Tasa de baudios	2.5 Gbaud/s
subportadoras	8
Prefijo cíclico	0,25
retardo	0
Frecuencia RF	10 GHz
Frecuencia láser	194 THz
Potencia láser	0 dBm
Modulador electro absorción	Por defecto de la herramienta

Como dentro de los parámetros a variar en la red FTTH-GPON está el número de ONT, a continuación se muestra un escenario de simulación para 4 ONT (ver figura 3.21), el resto de configuraciones se muestran en el capítulo 4.

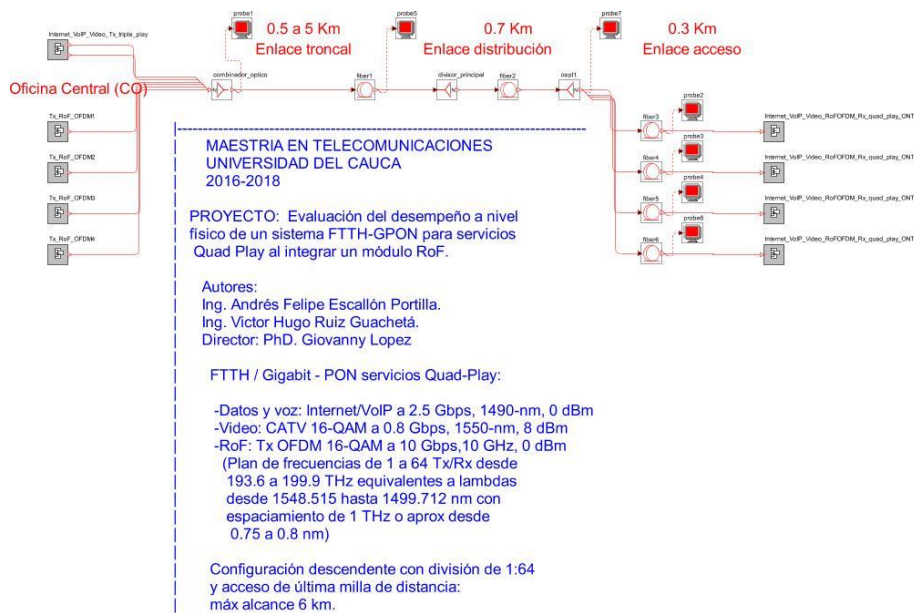


Figura 3.21 Configuración red FTTH-GPON con módulo RoF para 4ONT.

3.6. ASPECTOS A CONSIDERAR DENTRO DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN.

Para todos los escenarios de simulación se tienen en cuenta las características de configuración de parámetros mencionadas anteriormente. Además de eso, se considera que el tráfico es permanente y no variable (secuencias pseudoaleatorias para servicios *Triple Play*) utilizado en OptSim y en la mayoría de los artículos consultados, como por ejemplo en [44] [47]. Por su parte la potencia del láser es constante. Además, el tipo de modulación es externa (utiliza un modulador externo – MZM y el interferómetro de electro absorción para módulo *RoF*) debido a un mejor desempeño frente a la modulación directa (utiliza un modulador directo - *DML*), y el formato de codificación es NRZ debido a un mejor desempeño frente al formato Retorno a Cero (RZ, *Return to Zero*) [18]. El BW del formato NRZ es el doble del BW del formato RZ, y aunque en RZ el sincronismo está garantizado para facilitar la recuperación de la señal (apropiado para largas distancias y altas velocidades de transmisión de datos), dentro del contexto metropolitano (distancias menores a 100 Km) se escoge NRZ ya que su sincronismo no es tan crítico, y la señal se puede recuperar enviando previamente unos bits de sincronismo para enganchar el transmisor y el receptor.

Para el módulo RoF se trabajará con OFDM, Es importante decir que para la red característica no se utilizan elementos ópticos como amplificadores u OXC, debido a que un amplificador y un OXC comúnmente se emplean en redes cuya área de extensión sea mayor a la metropolitana, y además se considera que todos los elementos ópticos que se utilizan como multiplexores, filtros, demultiplexores y demás son ideales para efectos de la simulación, y porque el contexto del trabajo de grado es una red PON (acceso).

En los escenarios de simulación se miden los siguientes parámetros:

- Potencia de Señal Óptica en Recepción (PRxo).
- OSNR.
- Potencia de Señal Eléctrica en Recepción (PRxe).
- ESNR.
- BER.
- Factor Q.
- Distancia (X).
- EVM

Y sólo se trabaja con las velocidades de transmisión de datos de:

- 2.5 Gbps (no se manifiestan los *efectos no lineales*, si la potencia se mantiene dentro de la región lineal, y la *PMD* no es un problema).
- 10 Gbps (independientemente de la potencia, empiezan a manifestarse los *efectos no lineales*, y la *PMD* ya se torna problemática).

Lo anterior, debido a varios factores como:

- Licencia de OptSim.
- En el trabajo de grado se emplean solamente cuatro “parámetros” que son: *BER* y *Factor Q* como parámetros de monitoreo óptico avanzado, y *Dispersión Cromática* y *Atenuación* como degradaciones ópticas. Cabe notar que la constante de dispersión (*D*) y la constante de atenuación (*A*) son propias de la fibra óptica, que a su vez modela el comportamiento del canal óptico.
- A 40 Gbps también se manifiestan en mayor grado los *efectos no lineales* y la *PMD* es muy importante, pero el límite inferior es 10 Gbps. Lo anterior se justifica porque a velocidades superiores a 10 Gbps se emplean los solitones (compensación no lineal), los cuales son pulsos de formas especiales y con altos niveles de potencia que toman partido de las no linealidades en la fibra (específicamente de *SPM*) con el fin de solucionar los efectos de ensanchamiento del pulso de la *Dispersión de Velocidad de Grupo* (*GVD*, *Group Velocity Dispersion*) [18].

Es importante destacar que la dispersión cromática (la cual está relacionada intrínsecamente con la fibra) es la degradación óptica más importante en el contexto metropolitano, porque es la que mayor incidencia tiene en el desempeño de una red metropolitana, cuando la señal óptica proveniente del láser se propaga a través del canal óptico. Con respecto a la diafonía óptica, cabe resaltar que debido a que el multiplexor y el demultiplexor no se consideran ideales (es decir se consideran reales), la incidencia que tiene esta degradación en el desempeño de la red de acceso para efectos de la simulación, se tiene en cuenta.

➤ Escenarios de Simulación con Multiplexación WDM

La figura 3.22 muestra un esquema general para los escenarios con multiplexación WDM.

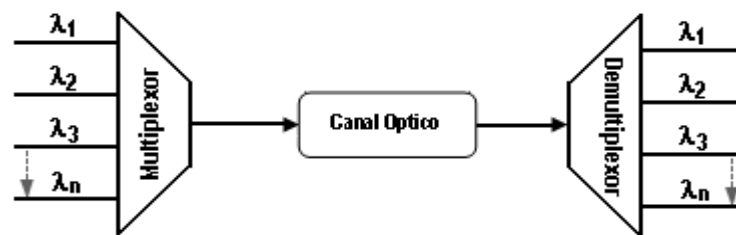


Figura 3.22 Esquema General para los Escenarios de Simulación con Multiplexación WDM.

Tales escenarios cumplen con los siguientes aspectos:

- Características:
 - Con Multiplexación (WDM): DWDM (64 λ s)

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

➤ Parámetros Fijos:

- Tipo de Fibra Óptica: SMF-28 y *CorningLEAF*.
- Velocidad = 0.8 Gpbs, 2.5 Gpbs, y 10 Gpbs.

➤ Parámetros Variables:

- Valores de λ (según Recs. ITU-T G.694.1 la cual especifica el plan de frecuencias para DWDM).
- Número de portadoras (λ): 2, 4, 8, 16, 32 y 64 (ONT).
- Distancia.

Para los escenarios de simulación, se necesita definir un plan de frecuencias con el fin de asegurar un buen desempeño del sistema, de acuerdo a las recomendaciones de la ITU-T.

Finalmente, después de haber descrito, adaptado y aplicado la metodología, estudiado y escogido la herramienta de simulación, diseñado la simulación, definido el modelo conceptual y el modelo de red con sus respectivos escenarios y configuración de parámetros, a continuación, se procede a analizar los datos de los resultados de las pruebas que permitan evaluar el desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF.

4. CAPÍTULO IV. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA RED FTTH-GPON PARA SERVICIOS *Quad Play*.

Después de haber estudiado todos los aspectos relacionados con el marco teórico y haber definido los escenarios de simulación, los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica se dividen en dos: *parámetros de monitoreo* (BER, SNR, Factor Q) y *degradaciones ópticas* (atenuación, dispersión cromática, diafonía, no linealidades). En este trabajo de grado se utilizan sólo cuatro de dichos parámetros generales: la *BER* y el *Factor Q* como dos de los parámetros de monitoreo más relevantes utilizados para medir la incidencia de la *dispersión cromática* y de la *atenuación* conjuntamente (es decir, se tienen en cuenta las respectivas constantes típicas de dispersión y de atenuación simultáneamente en la fibra óptica), las cuales corresponden a dos de las degradaciones ópticas más importantes, incluyendo las no linealidades de la fibra óptica, que van cambiando de acuerdo a la variación de ciertos parámetros de la red FTTH-GPON como: velocidad de transmisión, potencia de los transmisores, tipo de fibra y número de ONT (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64), aspectos que están plasmados en los diferentes escenarios de simulación. Se implementan los escenarios de simulación con el fin de determinar el comportamiento de la red FTTH-GPON, se analizan los resultados y las conclusiones de la simulación; finalmente se analiza la incidencia de la atenuación, dispersión cromática y no linealidades de la fibra en el desempeño de la red, y se evalúa el desempeño cuando se integra el módulo RoF a la red FTTH-GPON *Triple Play* existente con el fin de consolidar la red FTTH-GPON *Quad Play*.

4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS, GRÁFICAS Y CONCLUSIONES DE LA INCIDENCIA DE LA DISPERSIÓN CROMÁTICA, ATENUACIÓN, DIAFONÍA Y EFECTOS NO LINEALES DE LA FIBRA ÓPTICA EN EL DESEMPEÑO DEL SISTEMA FTTH-GPON *Quad Play*.

Para la sección de transmisión, en la ventana de 1550 nm se puede apreciar la incidencia que tienen los filtros ópticos cuando la señal se propaga a través de ellos. Se realiza una comparación de la calidad de la señal óptica en el dominio del tiempo (dispersión cromática), y en el dominio de la frecuencia (atenuación). Para la sección de recepción (Rx), análogamente se procede a mostrar los resultados del monitoreo de las señales. Se debe tener en cuenta que el filtro óptico actúa sobre la señal portadora recortando los armónicos y dejando así la frecuencia fundamental donde encuentra aproximadamente el 90% de la energía (potencia).

El comportamiento de la señal en el dominio del tiempo (Scope) permite analizar el efecto causado por la dispersión cromática que depende del tipo de fibra y de la velocidad de transmisión de datos. Además, se muestra el diagrama del ojo del sistema forzado al peor caso para el servicio de radio-telefonía celular (BER= 10^{-3} o Factor Q=9,8 dB) según la recomendado en [31], para finalmente analizar el desempeño de cada señal en términos la máxima distancia alcanzada. Independientemente de la velocidad de transmisión de datos,

la ventana de 1550 nm tiene mucho mejor comportamiento en cuanto a la incidencia de la dispersión cromática y de la atenuación para una fibra *CorningLEAF* (la cual es una de las más usadas y optimizadas en DWDM). El caso contrario ocurre con la fibra estándar SMF-28 que está optimizada para trabajar en la ventana de 1310 nm (normalmente es empleada para el enlace ascendente que está por fuera de los objetivos del presente trabajo de grado puesto que el enfoque es únicamente el enlace descendente). La fibra óptica modela el comportamiento del canal óptico (OCh) mediante las constantes de atenuación y dispersión. Todos los resultados fueron obtenidos la herramienta software OptSim.

La fibra *CorningLEAF* es la que mejor desempeño presenta en la ventana de 1550 nm, independiente de la velocidad de transmisión de datos (2.5 o 10 Gbps), debido a su baja constante de atenuación y al pequeño valor absoluto de su constante de dispersión. Cuando la velocidad de transmisión de datos es de 10 Gbps o superior, se observa una penalidad en la máxima distancia alcanzada independientemente del tipo de fibra (SMF-28 o *CorningLEAF*); lo anterior se debe principalmente a los efectos de la dispersión cromática que degradan significativamente el desempeño del sistema, manteniendo constante las condiciones del sistema. Como el sistema está optimizado para el caso de mínimo desempeño aceptable, el parámetro de medida que está variando sustancialmente es la distancia máxima alcanzada sin compensación de dispersión ni uso de amplificadores, porque los demás parámetros físicos de OPM (EVM, SNR, BER) están condicionados a la calidad del sistema, y por lo tanto están variando de forma mínima en torno a un valor determinado. De esta manera, con el fin de realizar un monitoreo completo del canal óptico en el dominio del tiempo (DT) y de la frecuencia (DF), para los casos de una sola portadora de radio (una sola ONT) y para varias portadoras de radio (varias ONT), se trabaja solamente con la fibra *CorningLEAF* que es la que mejor desempeño presenta, quedando la fibra SMF-28 descartada después de realizar algunas medidas.

La distancia máxima alcanzada sirve de referencia para el resto de las simulaciones; es decir, partiendo desde el uso de una sola ONT e incrementando en potencias de dos el número de ONT (2, 4, 8, 16, 32 y 64) empleando la fibra *CorningLEAF* a velocidades de transmisión de datos de 0,8 Gbps (video), 2,5 Gbps (voz y datos) y 10 Gbps (radio). Los resultados de monitoreo son evidentes al obtener los valores de los parámetros de medida tanto en el dominio de la frecuencia, entre los que se destacan la potencia de recepción óptica (PRxo) y la SNR, como en el dominio del tiempo, entre los cuales están la BER y el factor Q. Lo que se busca cuando se trabaja con una sola ONT es encontrar la máxima distancia de transmisión alcanzada para un factor Q igual o mayor a 9.8 dB, lo que equivale a una BER igual o menor a 10^{-3} para la señal de radio, correspondiente al peor caso a considerar (porque para la señal de video la BER debe ser igual o menor 10^{-7} , y para la señal de voz/datos la BER debe ser mínimo de 10^{-9}). Es importante resaltar que, si se busca el peor caso de desempeño de la red, la distancia alcanzada es mínima cuando la constante de atenuación es máxima y/o cuando el valor absoluto de la constante de dispersión es máximo; en cambio, la distancia alcanzada es máxima cuando la constante de atenuación es mínima y/o cuando el valor absoluto de la constante de dispersión es mínimo.

Además, para DWDM, la distancia máxima alcanzada también depende de la atenuación y de la dispersión, pero generalmente a 2.5 Gbps la atenuación es la que limita la distancia máxima alcanzada y, por otro lado, generalmente a 10 Gbps la dispersión es la que limita la distancia máxima alcanzada; finalmente se debe tener presente que las no linealidades de la fibra solo aparecen cuando se incrementa el número de ONT. A continuación, se muestran los diferentes escenarios y los resultados obtenidos dentro de la simulación realizada en OptSim, mediante los cuales se determina el comportamiento de las longitudes de onda al monitorear su

curso a través del canal óptico (representado por la fibra óptica⁶), con el fin de validar la incidencia de la dispersión cromática, de la atenuación y de las no linealidades en el desempeño de la red FTTH-GPON.

4.1.1. Escenarios de Simulación para una sola ONT.

Los escenarios básicos de simulación constan de una sola portadora inyectada a la fibra (y por lo tanto ni el efecto de la diafonía ni el efecto de las no linealidades están presente todavía, pues al aumentar el número de longitudes de onda transportadas es cuando dichos efectos influyen más significativamente afectando el desempeño del sistema), la cual va tomando valores dentro de la ventanas de transmisión más importantes (1550 nm), de igual forma se varía el tipo de fibra óptica (SMF-28 y Corning LEAF), para luego proceder a observar y analizar los parámetros de medida de acuerdo con los resultados obtenidos (EVM, SNR, BER y Distancia Máxima de Transmisión). Es importante aclarar que el modelo de red correspondiente a estos escenarios es en general para cualquier tipo de fibra, longitud de onda y velocidad de transmisión de datos (para el caso de estudio se empleó 0.8 Gbps para video, 2.5 Gbps para voz/datos y 10 Gbps para radio. Además, el objetivo es encontrar la máxima distancia alcanzada sin compensación de dispersión ni necesidad de emplear amplificadores.

Para dar inicio al análisis de los resultados con el fin de darle cumplimiento a los objetivos del presente trabajo de grado, después de caracterizar el escenario de simulación tal y como se realizó en el capítulo tres con los diferentes parámetros establecidos, fue necesario realizar un análisis general de:

- Red FTTH-GPON *Triple Play*
- Módulo de radio frecuencia sobre una red de fibra óptica (RoF)
- Red FTTH-GPON con el módulo RoF integrado (*Quad Play*)

Lo anterior con el fin de evaluar el desempeño a nivel físico de cada una de las partes por separado, y así poder observar el impacto que ocurre al integrar el módulo RoF sobre la red FTTH-GPON *Triple Play*. A continuación se realiza y analiza un monitoreo de la red FTTH-GPON *Triple Play* desde el transmisor hasta el receptor con una sola ONT.

➤ Red FTTH-GPON *Triple Play*

En la figura 4.1 se muestra el diseño de la red FTTH-GPON en cual se tomó como referencia las redes propuestas en [42] [45], donde se hace un análisis detallado del desempeño de esta red con base en los parámetros físicos OPM. Los parámetros de configuración ya se habían mostrado previamente en la tabla 3.1 del capítulo tres. En esta sección sólo se toman los datos de potencia, atenuación y espectro de frecuencias de la señal a medir que viaja por cada uno de los elementos de la red, esto con el fin de tener unos datos de

⁶ Los valores escogidos de atenuación y de dispersión para las fibras utilizadas en la simulación (SMF-28 y *CorningLEAF*) corresponden a datos de referencia y a datos reales, que se pueden encontrar en las recomendaciones ITU-T (G.652, G.653, y G.655) y en las "hojas de datos o data sheets" del proveedor de fibra Corning (<http://www.corning.com>).

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

referencia para poder comparar cuando se integre el modulo de RoF a esta red; cabe notar que esta red está caracterizada para el mejor caso de desempeño (BER) analizada en [42] [45].

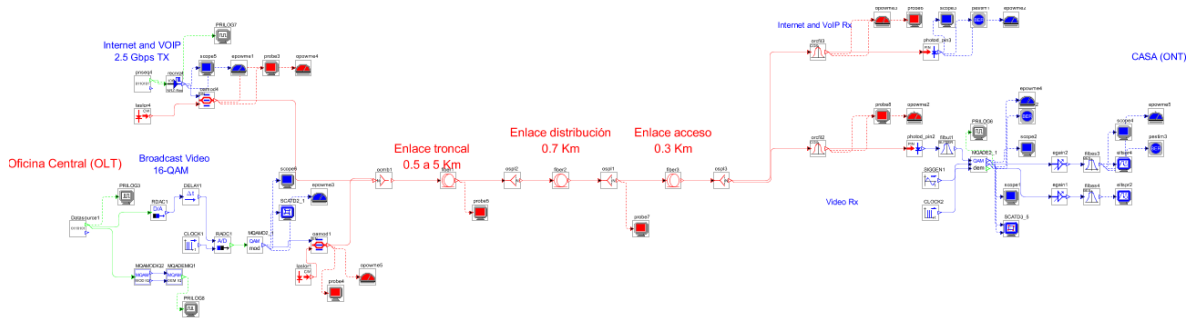


Figura 4.1. Red FTTH-GPON *Triple Play* con una sola ONT.

En la red anterior se tomó una distancia máxima de 5.887 Km ya que esta fue la que se alcanzó con el módulo de RoF para obtener una BER máxima aceptable de 10^{-3} en el receptor. Se debe tener en cuenta la tabla 3.1 que muestra los parámetros técnicos establecidos para la implementación y simulación.

La razón de iniciar el monitoreo de todas las señales desde el transmisor a través de gráficas, es con el fin de que se tenga un referente para comparar las señales recuperadas en el receptor. Iniciando desde el lado de transmisión, en la figura 4.2(a) se observa la señal de voz/datos de la fuente transmisora, la cual está a una velocidad de 2.5 Gbps, en concordancia con GPON.

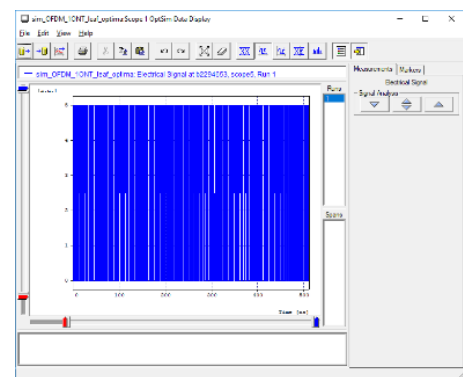
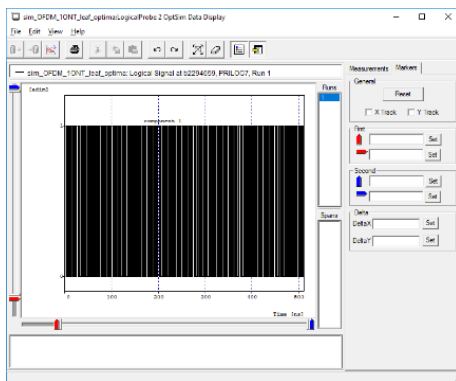


Figura 4.2 a) Señal de datos y VoIP. b) Señal eléctrica de datos y VoIP después del NRZ en el dominio del tiempo.

En la figura 4.2(b) se observa la señal después de que sale del NRZ, así mismo en la figura 4.3(a) se observa la misma señal en el dominio de la frecuencia.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

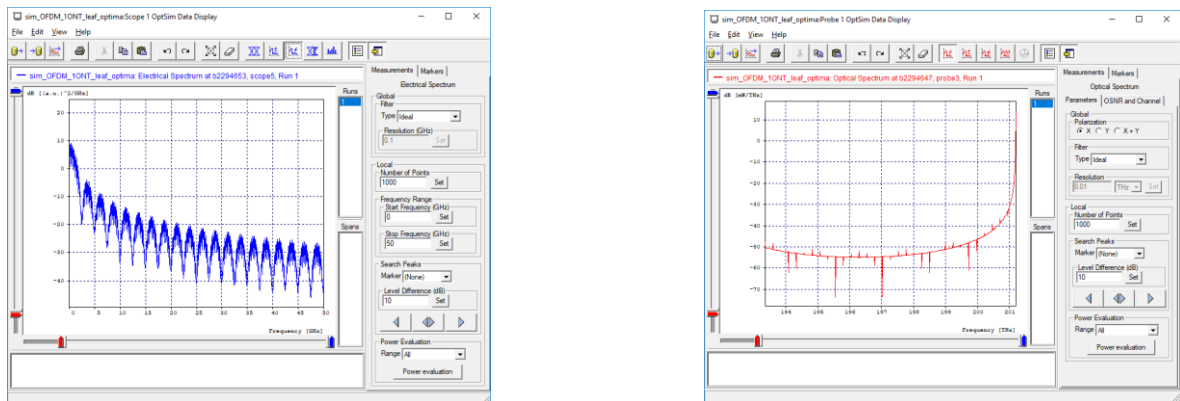


Figura 4.3. a) Señal eléctrica de datos y VoIP después del NRZ en el dominio frecuencia. b) Espectro de frecuencia señal en el Transmisor para VoIP y Datos.

En la figura 4.3(b) se pueden observar la señal eléctrica ya modulada en el dominio óptico a través del modulador Mach-Zehnder (MZM), como se puede apreciar está en la frecuencia de los 201,2 THz (longitud de onda de 1490 nm).

A continuación, se analiza la señal de video sobre la misma red. Tal y como se nombró en el capítulo tres, se tuvo que mejorar la señal de video para obtener una BER de 10^{-7} para cumplir con las condiciones mínimas de calidad, para ello lo que se realizó fue colocar un retardo a la señal de video en el dominio eléctrico tal y como lo recomiendan en [45], con el fin de que el modulador QAM y el demodulador QAM presentaran un mejor desempeño en su procesamiento de la señal. En la figura 4.4(a) se observa la señal de video ya en paralelo antes de ser modulada en 16 QAM, así mismo en las figuras 4.4(b) y 4.5(a) se observa la misma señal ya modulada en 16 QAM en el dominio del tiempo y en la frecuencia respectivamente. Como se puede observar la potencia de la señal después de que se modula es de 12 dB aproximadamente.

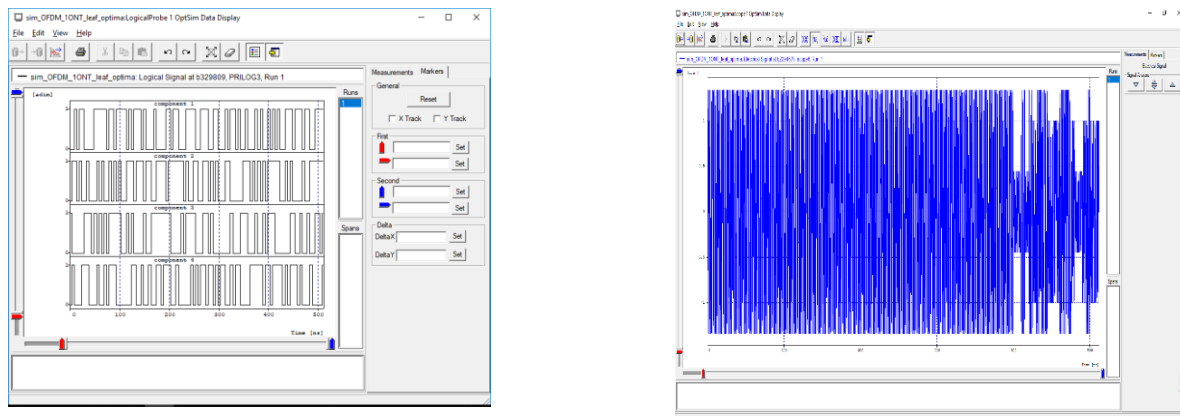


Figura 4.4. a) Señal de video en el Transmisor. b) Señal de video modulada en 16QAM en el dominio tiempo.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

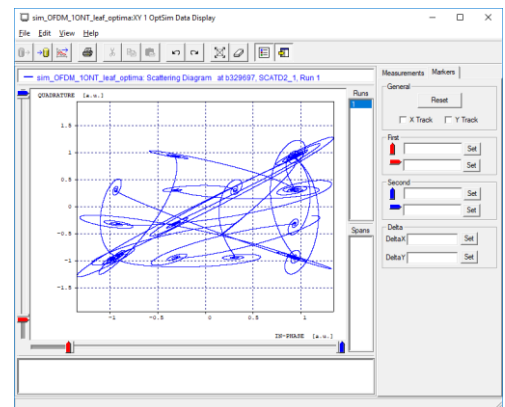
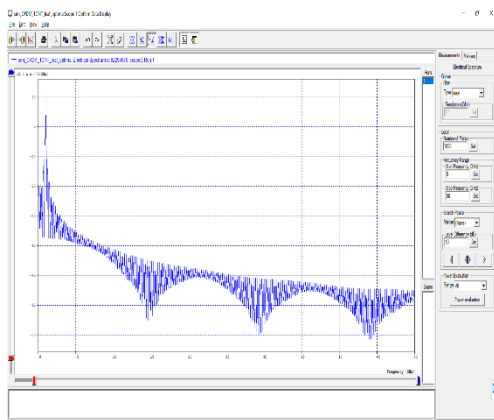


Figura 4.5. a) Señal de video modulada en 16QAM en el dominio de la frecuencia. b) Diagrama de constelación señal de video modulada en 16QAM.

En la figura 4.5(b) se observa el diagrama de constelación en fase y cuadratura de la señal de video modulada en 16QAM del lado del transmisor. En la figura 4.6(a) se observa la señal portadora en el dominio óptico después de que sale del modulador MZM, se puede apreciar que la señal tiene una potencia de 20 dB.

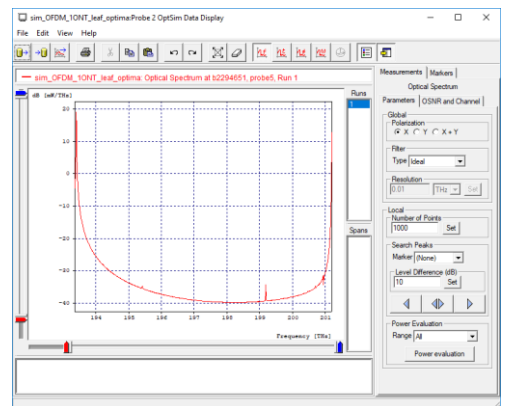
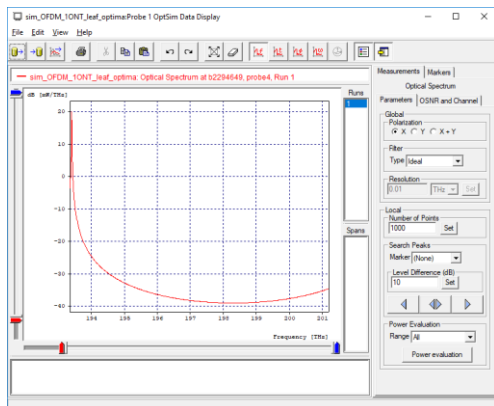


Figura 4.6. a) Señal de video a la salida del modulador MZM. b) Señal de video y datos después del combinador del lado del transmisor.

Ya entrando en el canal óptico, en las figuras 4.6(b) y 4.7(a) se muestran las señales en el dominio óptico en el transmisor como en el receptor antes de entrar al fotodiodo receptor de avalancha (PIN), como se puede apreciar tanto la señal de datos y de video presentan una potencia de 20 dB, pero en la figura 4.7(a) se puede notar que la señal ha sido atenuada en casi 7dB, debido a las características de la fibra y los divisores (splitters) que se encuentra en el tramo de los 5,887 Km. Se puede observar la presencia de otras señales espurias

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

(ruido) pero, si se comparan con la potencia de las señales de video y datos, son insignificantes, lo cual no tiene un efecto muy notable en la red FTTH-GPON.

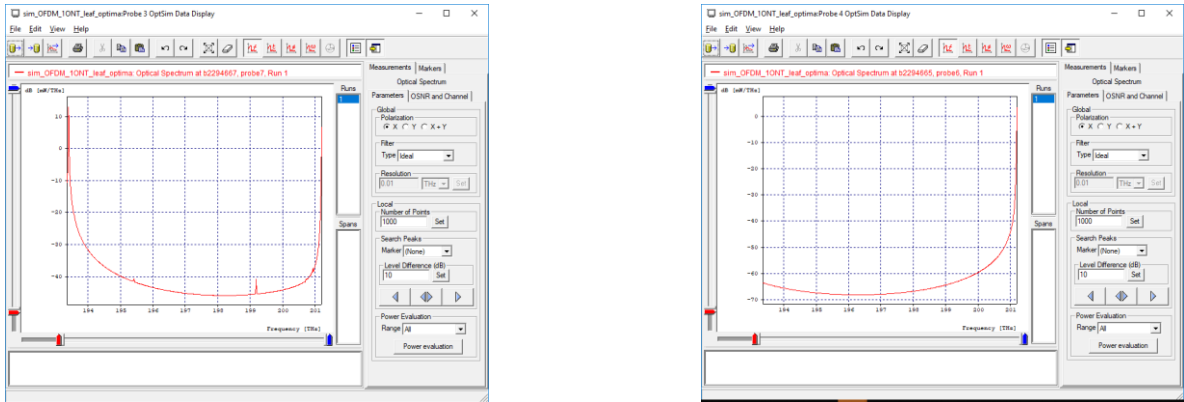


Figura 4.7. a) Señal de video y voz/datos antes de pasar a los filtros para ser separadas. b) Señal de voz/datos después de pasar por el filtro.

Continuando con el análisis de las señales de video y datos del lado de recepción, como se puede apreciar en la figura 4.7(b) la señal de voz/datos se ve atenuada en un factor de aproximadamente 10 dB, esto debido a las características de la fibra, el filtro y el modulador MZM hacen que la señal óptica se atenúe. Pero, aun así, en las gráficas 4.8(a), 4.8(b) y 4.9 se puede observar que la señal se puede recuperar de manera correcta, esto se puede apreciar con el diagrama del ojo mostrado en la figura 4.9 en donde se presenta una BER de 10^{-40} , un factor Q de 34,2 dB y un jitter muy cercano cero, lo cual indica un desempeño muy bueno. Por lo tanto, se puede concluir que para los parámetros de configuración que se dieron para esta red, la señal de voz/datos no se ve afectada.

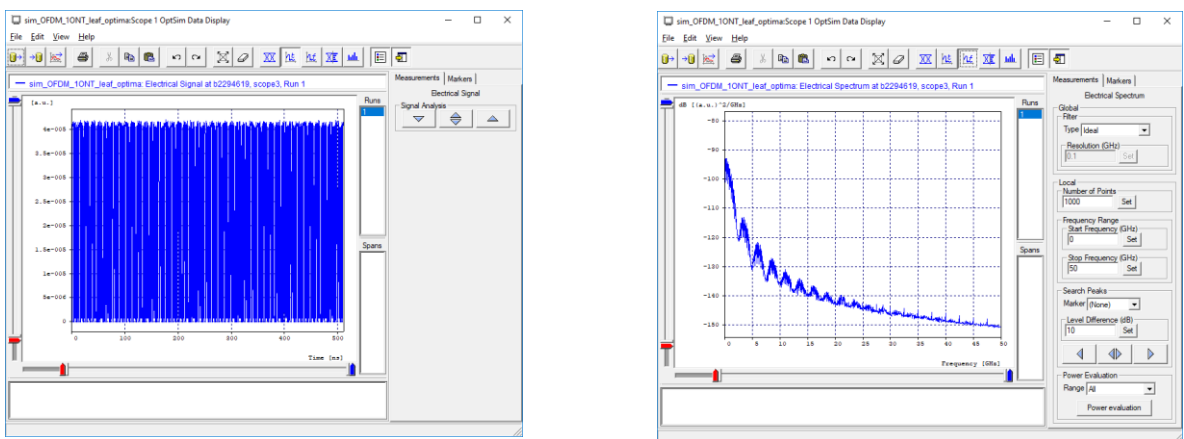


Figura 4.8. a) Señal de Datos en el receptor en el dominio eléctrico y tiempo. b) Señal de Datos en el receptor en el dominio eléctrico y frecuencia.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

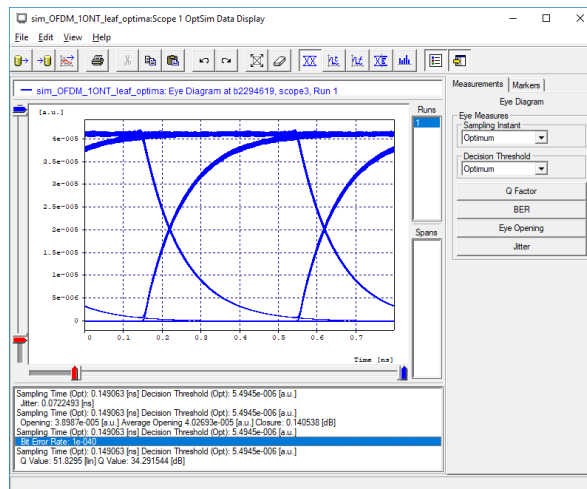


Figura 4.9. Diagrama del ojo para la señal de voz/datos.

Para la señal de video en la figura 4.10(a) se puede observar que se atenuó en 10 dB con respecto a la señal de salida en transmisión, esto debido a que la señal de video está trabajando en una longitud de onda más baja (1490 nm) en donde la atenuación es un poco mayor que en 1550 nm, a esto se le suma la atenuación que presenta la fibra óptica, el filtro, los splitters y el modulador MZM. Por lo que se puede decir la señal de video se ve más afectada que la de voz/datos. Todo lo anteriormente expuesto se puede corroborar con la teoría del análisis del diagrama del ojo que está expuesta de forma completa en los Anexos del presente trabajo de grado.

En la figura 4.10(b) se aprecia la constelación de la señal de video en el demodulador 16QAM que percibe una rotación de 45° aproximadamente. Así mismo, en la figura 4.11 se observa el diagrama del ojo de la señal de video en donde se puede apreciar sus parámetros de desempeño los cuales cumplen con [42], se tiene una BER de 4.19633×10^{-7} , un factor de calidad de 13,4291 dB y un jitter de 1,9 ns, concluyendo que los datos obtenidos son aceptables en cuanto al desempeño se refiere.

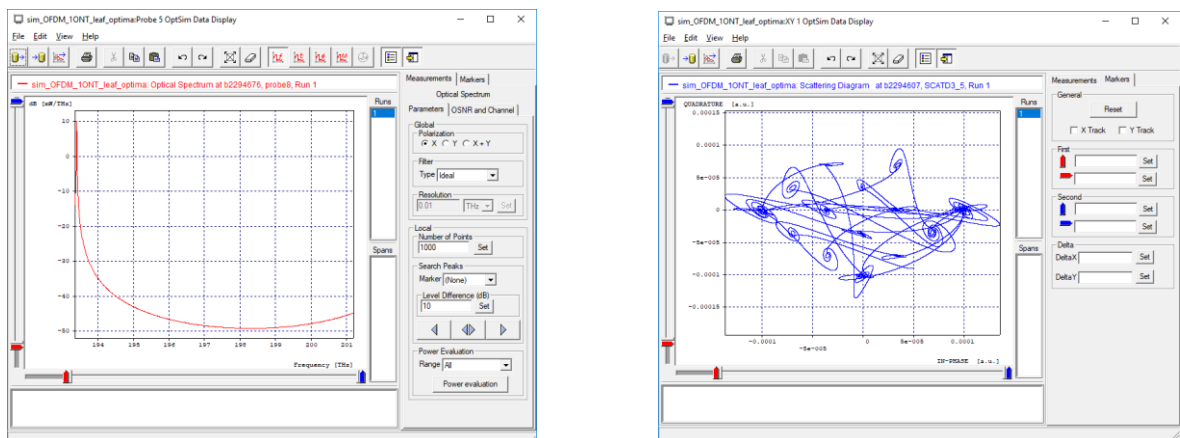


Figura 4.10. a) Señal de video en el dominio de la frecuencia en el receptor. b) Diagrama de constelación en el demodulador 16QAM.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

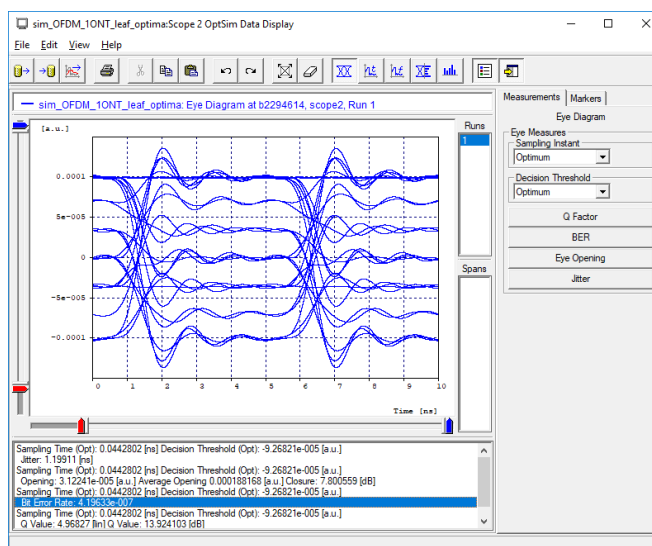


Figura 4.11. . Diagrama del ojo de la señal de video.

Lo expuesto en la figura 4.11 se puede contrastar con la teoría del análisis del diagrama del ojo que está expuesta de forma completa en los Anexos del presente trabajo de grado.

Ahora bien, continuando con el análisis de la red FTTH-GPON variando la distancia, en la tabla 4.1 se observa las diferentes distancias que se simularon con base en la máxima distancia que se obtuvo con el módulo RoF integrado.

Tabla 4.1. Variación de distancia empleada para las distintas simulaciones.

Simulación [Run]	DISTANCIA [Km]
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	5,887

En la figura 4.12 se observa el espectro de frecuencias de la señal de voz/datos, video y RF entrando en el canal óptico del lado del transmisor. Se aprecia que la variación para las diferentes distancias no es significativa; es decir, no se atenúan en gran medida cuando la distancia aumenta.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

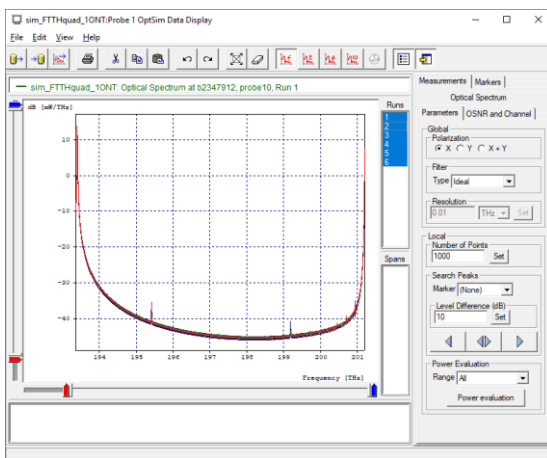


Figura 4.12. Espectro en frecuencia de los diferentes servicios de la red FTTH GPON en el canal óptico.

Para la señal de voz/datos, en las figuras 4.13(a), 4.13(b) y 4.14 se observan sus parámetros de desempeño, en donde se nota que la BER permanece casi constante a medida que la distancia aumenta, lo cual concuerda con los diagramas de ojo para cada distancia que son bastante similares y la relación de potencia versus distancia varía de forma lineal, alrededor de 1,7 dB por cada Km recorrido, lo cual es bajo, concordando con la figura 4.13(b). En conclusión, como se trata con distancias pequeñas donde los efectos de la atenuación y dispersión cromática son menores, el desempeño de la señal de voz/datos en la red FTTH-GPON no se afecta en gran medida obteniendo parámetros de desempeño excelentes, pues por ejemplo en [44] [47] se trabaja con distancias de 20 Km entre OLT y ONT y aún así se obtienen resultados de desempeño aceptables.

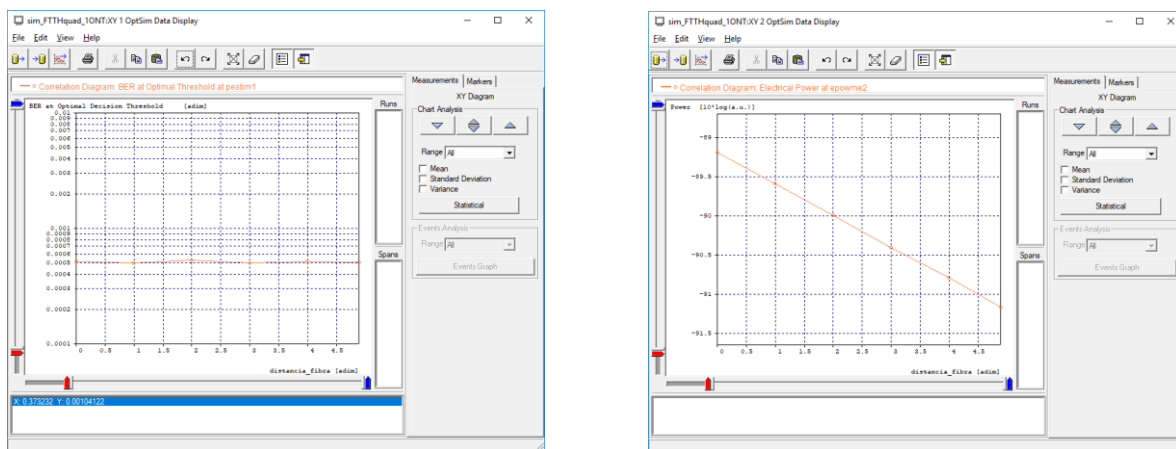


Figura 4.13. a) BER vs Distancia para la señal de voz/datos. b) Potencia de Recepción eléctrica vs Distancia para la señal de voz/datos.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

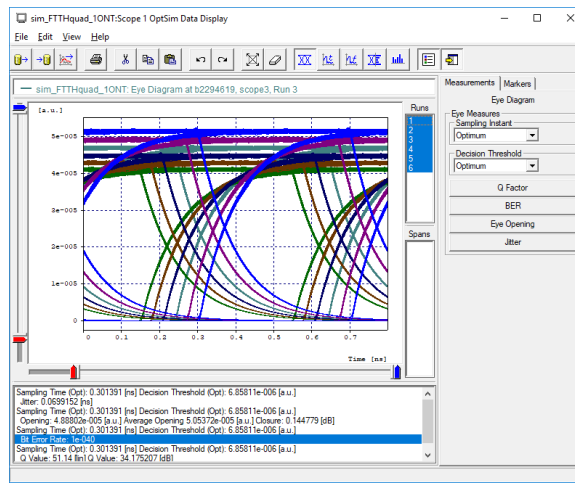


Figura 4.14. Diagrama de Ojo en función de la Distancia para la señal de voz/datos.

De forma análoga a lo analizado anteriormente para la señal de voz/datos, se procede ahora entonces con el análisis de la señal de video, porque en las figuras 4.15(a), 4.15(b) y 4.16 se observa los parámetros de desempeño en donde se corrobora que la BER permanece casi constante a medida que la distancia aumenta (obviamente empeorando pero en pequeñas cantidades dado que las distancias no son tan grandes como para que se hagan evidentes los efectos), lo cual concuerda con los diagramas de ojo para cada distancia (no hay grandes variaciones) y la relación de la potencia de recepción eléctrica en función de la distancia es lineal (también está alrededor de 1,7 dB por cada Km recorrido, lo cual es bajo, concordando con la figura 4.15(b)).

En conclusión, al tratarse con distancias relativamente pequeñas, el desempeño de la señal de video en la red FTTH-GPON no se afecta en gran medida obteniendo parámetros de desempeño muy buenos, en concordancia con lo obtenido en [44] [47].

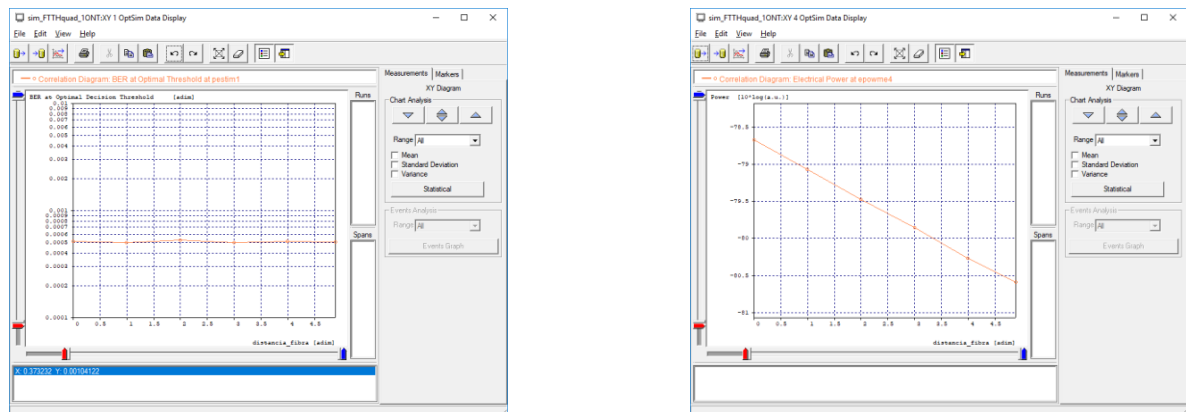


Figura 4.15. a) BER vs Distancia para la señal de video. b) Potencia de Recepción eléctrica vs Distancia para la señal de video.

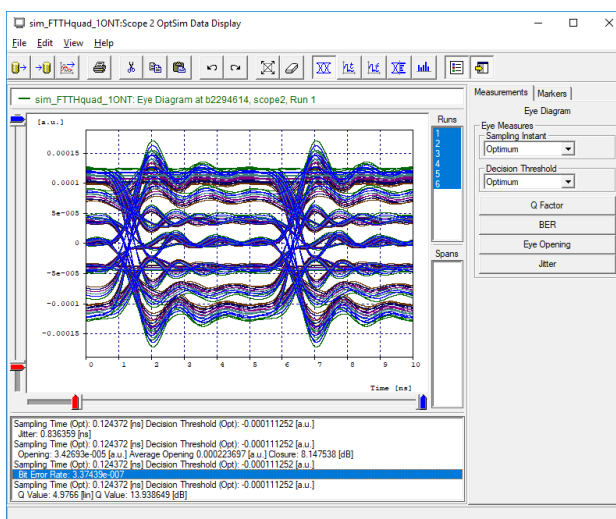


Figura 4.16. Diagrama de Ojo en función de la Distancia para la señal de video.

La teoría del análisis del diagrama del ojo que está expuesta de forma completa en los Anexos del presente trabajo de grado permite concluir que los resultados de la figura 4.16 son buenos en cuanto al desempeño del servicio de video para distancias relativamente pequeñas dentro del contexto del acceso de último kilómetro según [44] [47].

➤ Módulo de radio frecuencia sobre una red de fibra óptica (RoF)

A continuación, se analiza el desempeño a nivel físico del módulo de radio frecuencia propuesto en el capítulo tres. Como se mencionó anteriormente, se tomó un módulo RoF que trae por defecto la herramienta OptSim y se buscó mejorar la BER ya que dicho módulo presentaba una BER muy mala del orden de 10^{-2} . Para lograr esto, lo que se propuso fue cambiar el modulador Mach-Zehnder (MZM) por el modulador de Electro-Absorción (EAM) en la cual se notó una gran mejoría de la BER y así se pudo alcanzar una mayor distancia, teniendo en cuenta que la BER debe estar como máximo en el orden de 10^{-3} , llegando en el mejor de los casos a un valor mínimo del orden de 10^{-12} tal y como se recomienda en [31]. Dicha distancia sirvió como referencia para analizar los parámetros de desempeño de la red FTTH-GPON *Triple Play* antes de integrar el módulo RoF.

En adelante se procede a realizar el monitoreo de desempeño del módulo RoF desde transmisión hasta recepción. En la figura 4.17 se observa el módulo RoF, para el cual se deja la distancia máxima encontrada que fue de 5,860 Km. Cabe resaltar que para alcanzar esta distancia de 5,860 Km no solamente fue necesario cambiar el modulador MZM sino también el tipo de fibra óptica, quedando la red RoF con una fibra tipo corningLEAF porque este tipo de fibra óptica tiene un mejor desempeño que la estándar SMF-28 para la ventana de 1550 nm [18]. Cabe resaltar que se hizo la prueba usando la fibra SMF-28 y solo se alcanzó una distancia máxima de aproximadamente 1,267 Km, demostrando que tan solo al cambiar el tipo de fibra a una CorningLEAF se ganó una distancia de aproximadamente 4,620 Km dejando todo lo demás constante, tomando como muestra el canal de 194 THz (1535.3219 nm).

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

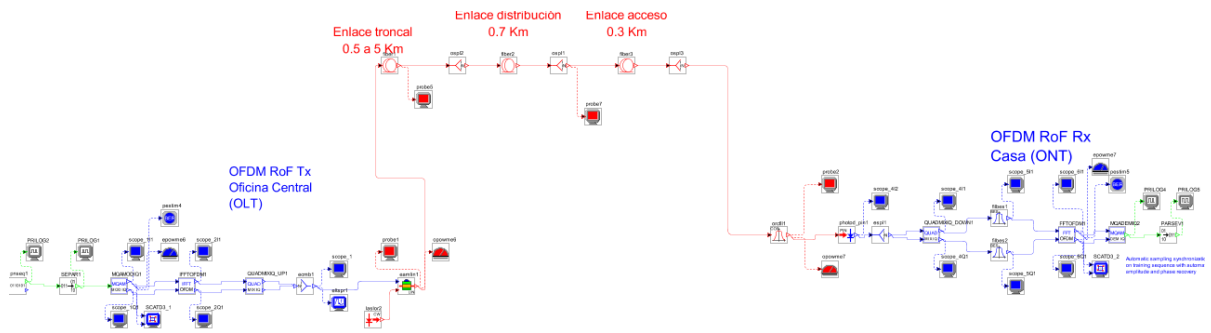


Figura 4.17. Esquema general del módulo RoF.

Es pertinente iniciar por el análisis de las señales en el transmisor. En las figuras 4.18(a) y 4.18(b) se muestra la señal de datos en serie y en paralelo antes de entrar al modulador 16QAM.

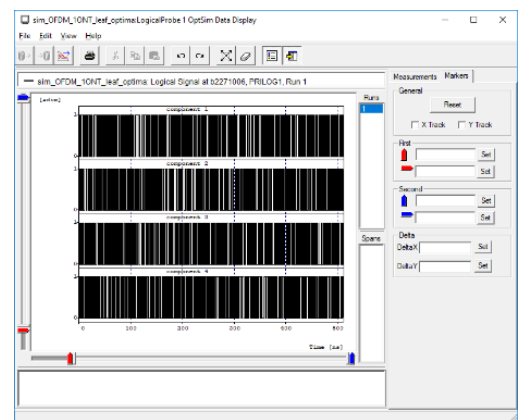
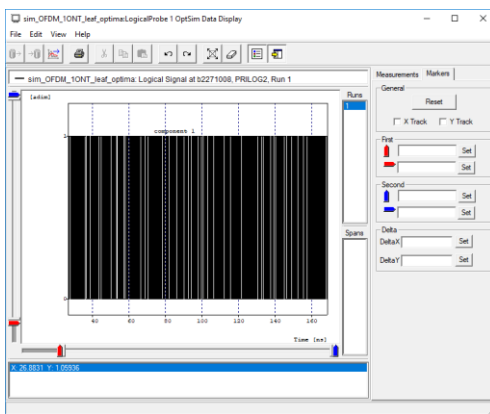


Figura 4.18. a) Señal de la fuente de datos a 10 Gbps. b) Señal de la fuente de datos convertida a paralelo cada una a 2.5 Gbps.

En la figura 4.19 (a) y 4.19 (b) se pueden apreciar la forma de la señal después de salir del modulador 16QAM, tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, dicha señal se encuentra en banda base.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

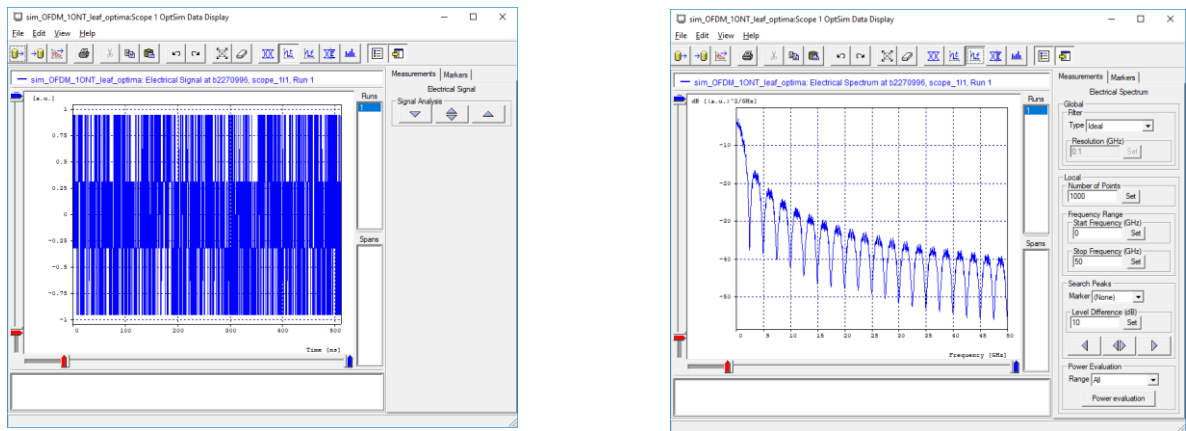


Figura 4.19. a) Señal “I” después del modulador 16QAM en el dominio del tiempo. b) Señal “I” después del modulador 16QAM en el dominio de la frecuencia.

Así mismo en la figura 4.20 se observa el diagrama de constelación en fase y cuadratura de la señal modulada, dicho diagrama muestra que realmente el modulador está funcionando correctamente ya que concuerda con una constelación de 16QAM antes de entrar al medio de transmisión, esto se puede comparar en [9] [47]. Además, la teoría del EVM y su relación con el diagrama de constelación de 16QAM expuesta de forma completa en los Anexos del presente trabajo de grado, permite deducir que los resultados de la figura 4.20 son buenos en cuanto al desempeño del servicio de radio para distancias relativamente pequeñas dentro del contexto del acceso de último kilómetro.

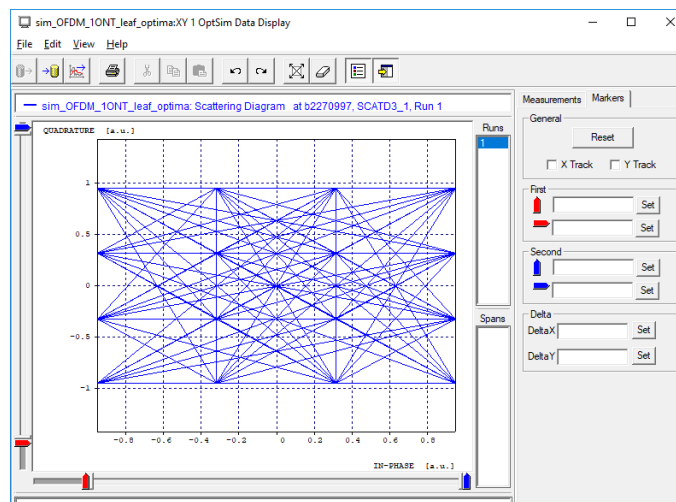


Figura 4.20. Diagrama de constelación en fase y cuadratura de la señal del modulador 16QAM.

Una vez la señal está modulada en 16QAM, dicha señal se modula adicionalmente en frecuencias ortogonales OFDM, para ello se aplica la transformada inversa de Fourier la señal sigue estando en banda base (BB). En las figuras 4.21(a) y 4.21(b) se puede observar el comportamiento de la señal OFDM tanto en el dominio del

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

tiempo como en el dominio de la frecuencia; esta señal se puede comparar con lo mostrado en [31] [9] [8] [48], donde se muestran gráficas similares garantizando de esta manera que la señal OFDM está correcta.

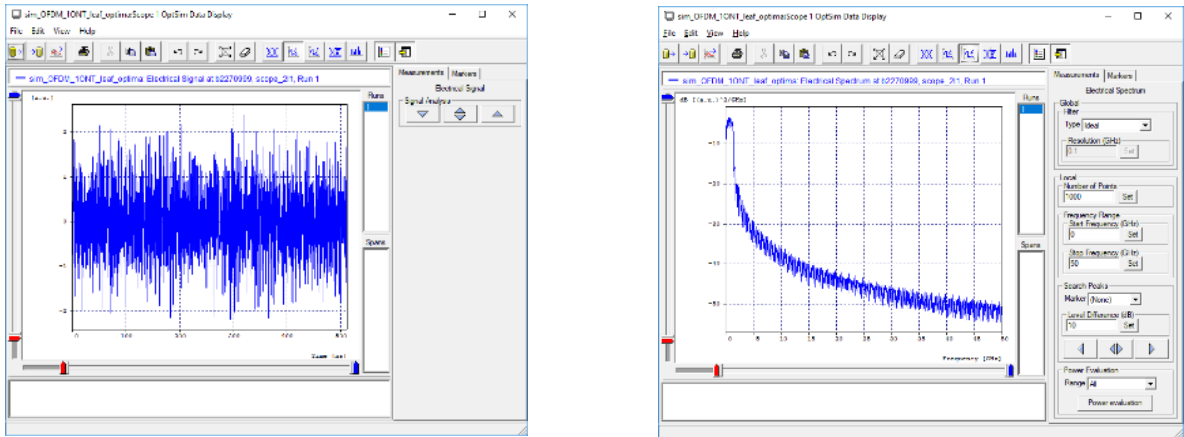


Figura 4.21. a) Señal OFDM en el dominio del tiempo. b) Señal OFDM en el dominio de la frecuencia.

La señal OFDM es transformada a alta frecuencia (RF) utilizando el módulo QUADMIXQ de OptSim, en el cual se utiliza para tal fin una estructura matemática a su interior tal y como se explica en el manual de OptSim [46]. En las gráficas 4.22(a) y 4.22(b) se aprecia el comportamiento de la señal OFDM en alta frecuencia que corresponde con lo mostrado en [8] [9][31] [48]. En la figura 4.22(b) se observa que las 8 subportadoras de la señal OFDM tienen una potencia promedio de -7dB, con una frecuencia central de 10GHz, esta figura está indicando también el espectro de la señal OFDM en el dominio de la frecuencia y el ancho de banda que esta utilizando.

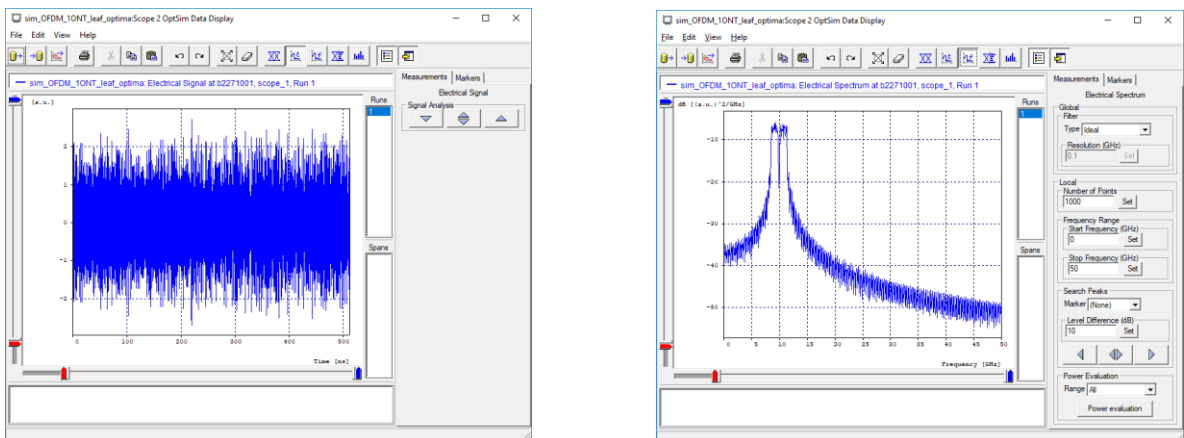


Figura 4.22. a) Señal OFDM (RF) en el dominio del tiempo. b) Señal OFDM (RF) en el dominio de la frecuencia.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

Una vez la señal se encuentre en alta frecuencia (RF) es modulada a través del modulador de electro absorción para pasar al dominio óptico asociada a una λ de 1545,32195 nm (194 THz). El comportamiento de dicha señal se observa en la figura 4.23 donde se aprecia que tiene una potencia de 16 dB antes de entrar al canal óptico.

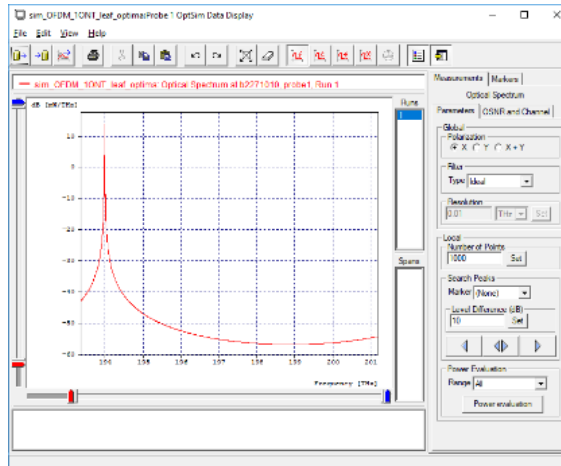


Figura 4.23. Señal RoF en el transmisor.

Dentro del análisis de la señal RoF, una vez la señal entra al canal óptico en recepción sufre una atenuación de casi 9 dB, tal y como se aprecia en las figuras 4.24(a) y 4.24(b), debido a la distancia recorrida por la señal, la presencia de los splitters, el filtro, el modulador óptico y las características de la fibra óptica.

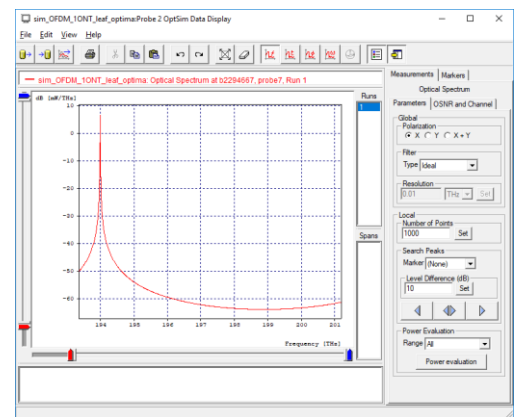
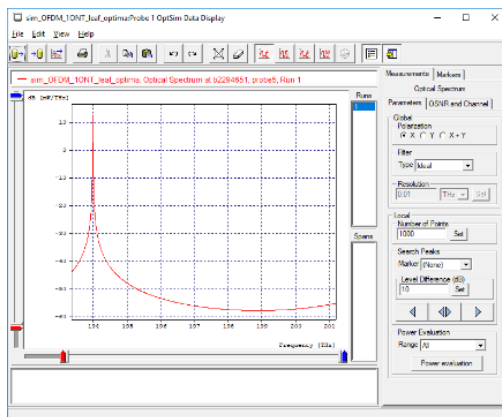


Figura 4.24. a) Señal RoF en el transmisor. b) Señal RoF en el receptor.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

Finalmente, realizando un análisis de la señal RoF en el receptor, se describe el comportamiento que tuvo la señal una vez llegó ahí y pasó del dominio óptico al eléctrico, como se puede observar en las figuras 4.25(a) y 4.25(b) tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia respectivamente. Se puede apreciar que la señal OFDM sufre una atenuación con respecto al transmisor de casi 98 dB (dominio de la frecuencia) que es bastante considerable debido a las degradaciones que se presentaron en el medio óptico, así como también al pasar del dominio óptico al eléctrico se tiene una gran atenuación de la señal (efecto del fotodiodo PIN), pero aun así el receptor es capaz de recuperar la información.

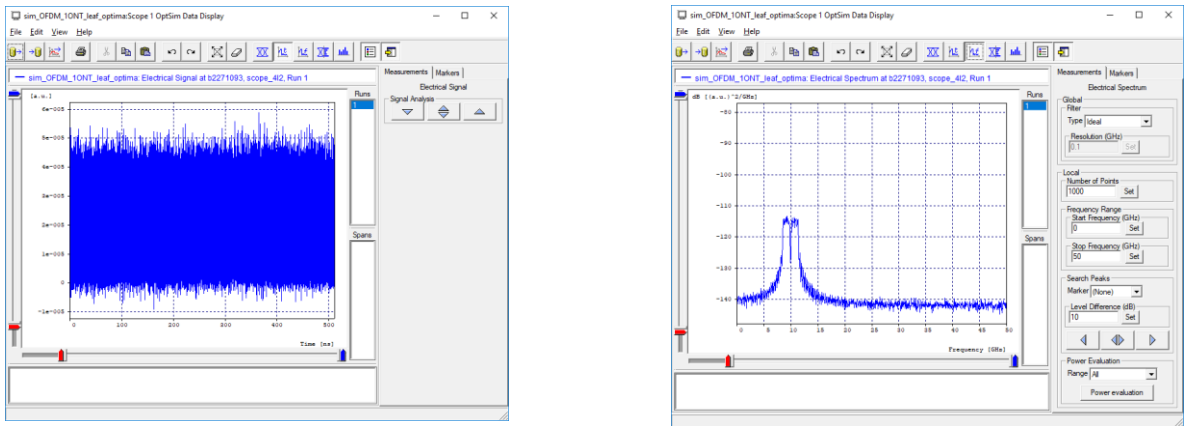


Figura 4.25. a) Señal RoF en el receptor en el dominio eléctrico temporal. b) Señal RoF en el receptor en el dominio eléctrico espectral.

En la figura 4.26(a) se puede observar la señal OFDM después de aplicarle la transformada de Fourier. Dicho módulo le da una ganancia de aproximadamente 98 dB a la señal con el fin de poder recuperar los datos exitosamente. De igual manera, en las figuras 4.26(b), 4.27(a) y 4.27(b) se observa la señal una vez ha sido demodulada en 16QAM donde se puede apreciar que guarda similitud con la señal del transmisor, lo que indica que los datos se pueden recuperar perfectamente, en concordancia con lo expuesto en [8] [9] [31] [48], donde el análisis y los diagramas de la señal son bien similares.

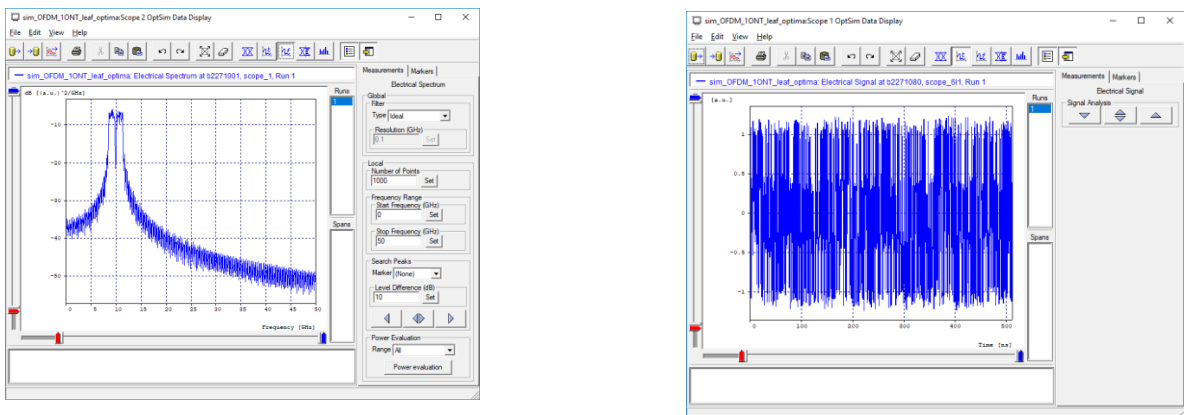


Figura 4.26. a) Señal OFDM en el receptor dominio de la frecuencia. b) Señal RF en el receptor dominio de la frecuencia banda base.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

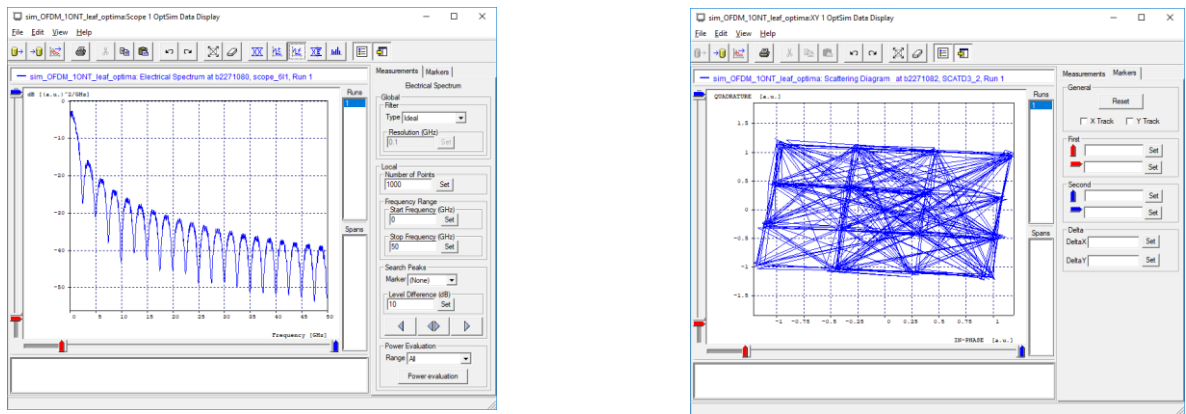


Figura 4.27. a) Señal OFDM en el receptor dominio de la frecuencia. b) Constelación en cuadratura y fase de la señal de radio en el receptor.

Como se puede observar en la figura 4.27(b) se tiene una constelación en fase y cuadratura aceptable, lo que indica que los datos se pueden recuperar de buena manera en el receptor, verificando una vez más que las formas de las señales de las gráficas anteriores en recepción están correctas, se puede observar también que el diagrama de constelación con respecto al inicial se ha rotado un ángulo de 30° aproximadamente, se le calculó el EVM que fue de 14.82%, representando una BER de 0.95×10^{-3} , valor que es aceptable en sistemas de radio frecuencia, según lo expuesto en [31].

En las gráficas 4.28(a) y 4.28(b) se pueden observar la señal después de que ya fue demodulada, correspondiendo a la señal que se transmitió.

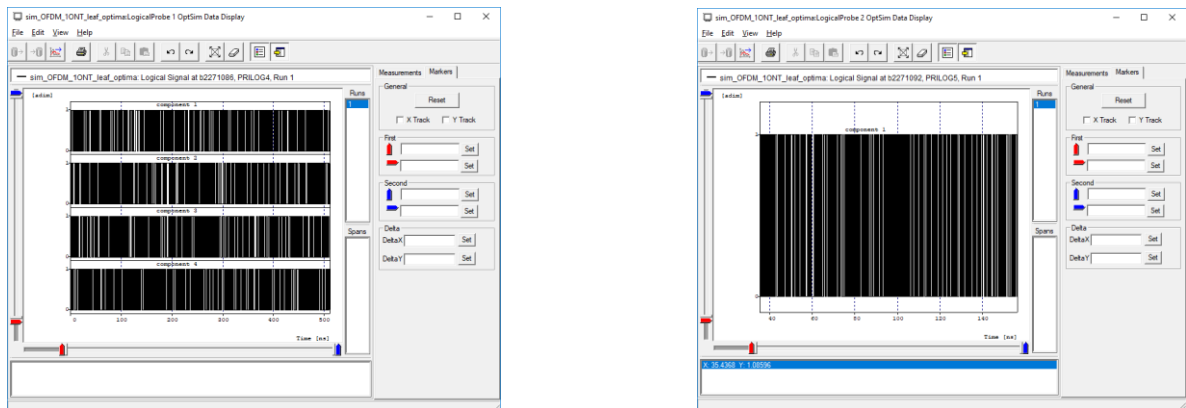


Figura 4.28. a) Señal recuperada en paralelo. b) Señal recuperada en serie.

En conclusión, se puede decir que el módulo RoF diseñado en este trabajo de grado presenta un buen desempeño con los parámetros establecidos en el capítulo tres alcanzando una distancia máxima sobre fibra óptica de 5,860 Km con un EVM del 14,87% y una SNR de 16,55 dB, que cumple con las condiciones para ser integrado en una red de acceso *Triple Play* con el fin de consolidar la red FTTH-GPON *Quad Play*.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

Análogamente a lo mostrado en la tabla 4.1, se realiza el monitoreo de una sola ONT desde el canal óptico hasta recepción variando la distancia desde 1 km hasta la máxima alcanzada (5,860 Km) para cumplir con o mínimo aceptable en cuanto al desempeño del sistema (máxima BER permitida). En la figura 4.29(a) se aprecia el espectro frecuencia del canal RoF de muestra (194 THz) en el canal óptico variando la distancia y en la figura 4.29(b) se observa la potencia óptica de recepción versus distancia. Dichos resultados muestran que a medida que la distancia entre OLT y ONT aumenta, el desempeño del sistema va empeorando debido principalmente al efecto de la atenuación y dispersión cromática intrínsecas de la fibra óptica.

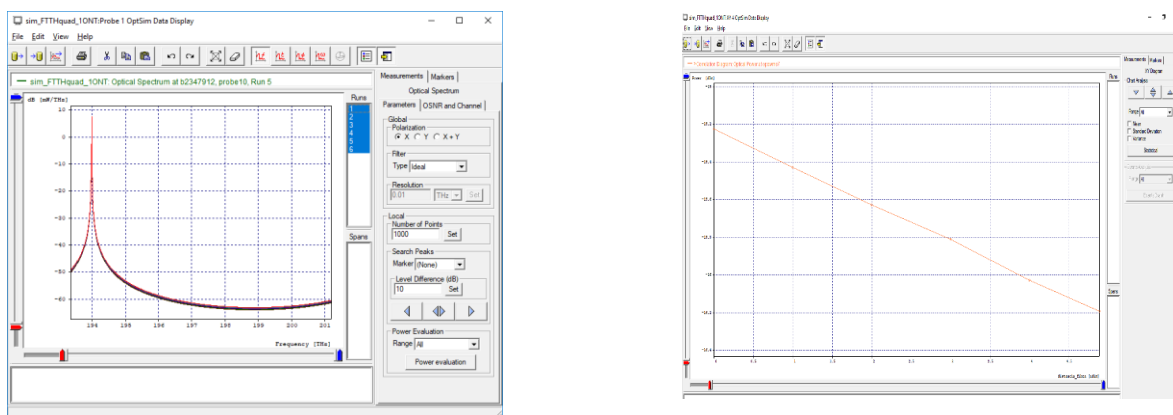


Figura 4.29. a) Espectro en frecuencia del canal RoF de muestra (194 THz) en el canal óptico variando la distancia. b) Potencia óptica de recepción vs distancia.

En la figura 4.30 se puede observar la variación de los principales parámetros de la señal de radio OFDM en la red FTTH-GPON, donde se puede evidenciar que el EVM va decreciendo hasta llegar a su valor máximo permitido (14,87%), correspondiente a una BER de 10^{-3} la cual es la máxima aceptada en señales de radio, de acuerdo con lo mencionado en [31].

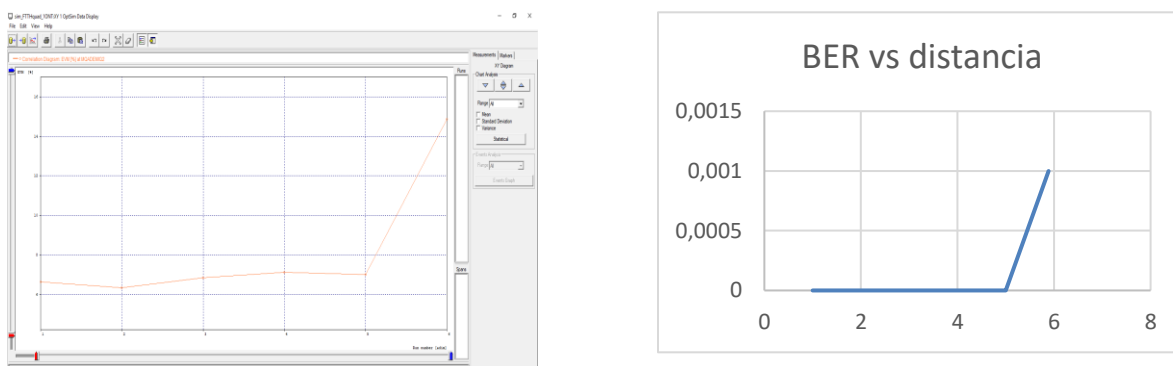


Figura 4.30. a) EVM vs distancia. b) BER vs distancia.

El EVM del módulo RoF sin aún ser integrado a la red es de 17,56932% cuando la distancia es de 5,887 Km. Al ser integrado a la red FTTH-GPON *Triple Play* existente, el nuevo EVM es de 14,87726% (distancia máxima de 5,877 Km). Es decir, que si el módulo RoF está solo, la distancia máxima alcanzada bajaría a 5,860 Km (penalidad de 17 m).

➤ **Análisis de la Red FTTH-GPON con el módulo RoF integrado (*Quad Play*) para una sola ONT**

Se describe y analiza el desempeño de la red FTTH-GPON al integrar el módulo de radio frecuencia en esta red, en términos de los parámetros de desempeño OPM a nivel físico como: EVM, SNR, BER, y factor Q.

Como se enunció en el capítulo tres, los parámetros son los mismos tal y como se enumeran en la tabla 3.1 y 3.2. Se analiza primero la distancia máxima alcanzada por el módulo RoF actuando solo y luego se varia la distancia al integrarlo a la red FTTH-GPON *Quad Play*. Mas adelante, se analiza el comportamiento de la señal cuando viaja desde transmisión hacia recepción para los servicios de voz/datos, video y la señal de radio (cuarto servicio).

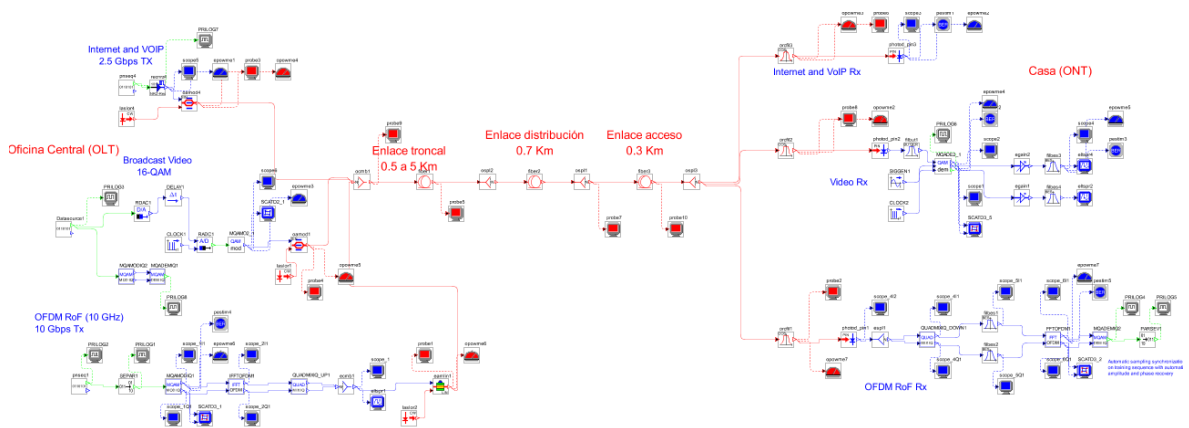


Figura 4.31. Red FTTH-GPON con el módulo RoF integrado para una sola ONT.

En la red de la figura 4.31 se tomó una distancia máxima de 5,887 Km de distancia ya que esta fue la que se alcanzó con el módulo de RoF para obtener una BER máxima aceptable de 10^{-3} en el receptor tal y como se nombra en [13] [31], teniendo en cuenta que se tuvo que cambiar el tipo de fibra óptica pues con la fibra estándar (SMF-28) solo se alcanzó una distancia máxima de 1,2567 Km y con la fibra adecuada para trabajar en la ventana de los 1550 nm llamada *CorningLEAF*, la distancia máxima alcanzada fue de 5,887 Km por tener una baja atenuación y mejor coeficiente de dispersión (más cercano a cero) con respecto a la estándar [18].

Como se puede observar en las figuras 4.32 a 4.41, el comportamiento de las señales del lado de transmisión (para los cuatro servicios) es el mismo antes de integrar el módulo RoF a la red FTTH-GPON.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

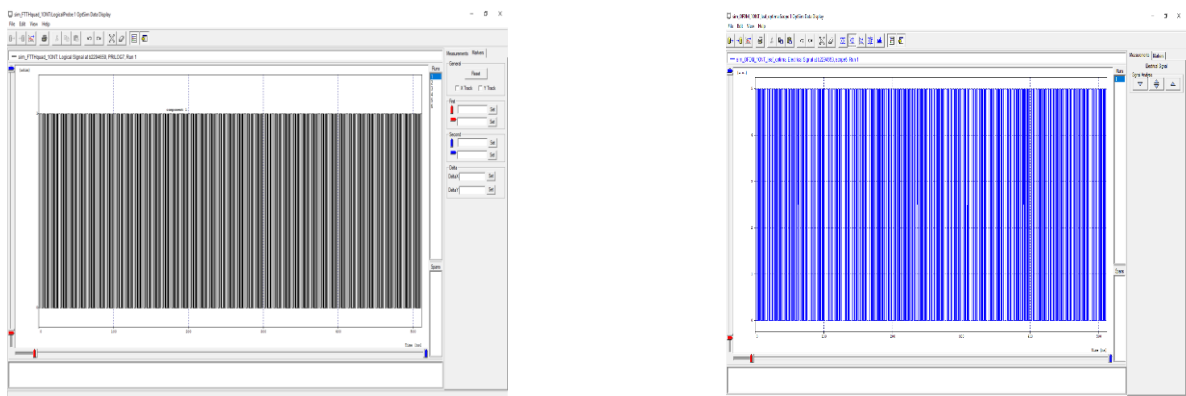


Figura 4.32. a) Señal de datos en el Transmisor. b) Señal de Datos a la salida del NRZ.

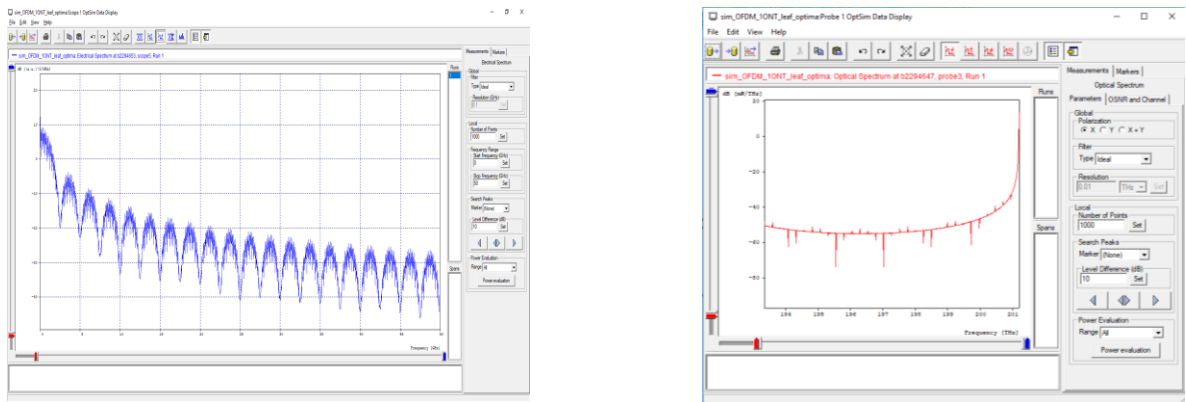


Figura 4.33. a) Señal de datos en el dominio de la frecuencia a la salida del NRZ. b) Señal de datos en el dominio óptico a 1490 nm (201,2 THz).

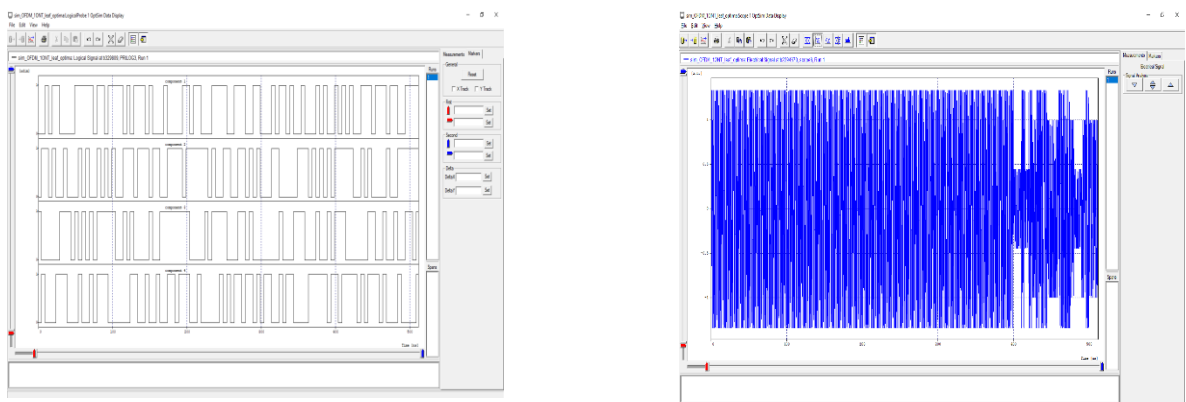


Figura 4.34. a) Señal de video en el Transmisor a 0,8 Gbps. b) Señal de video en el Transmisor modulada en 16QAM (dominio del tiempo).

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

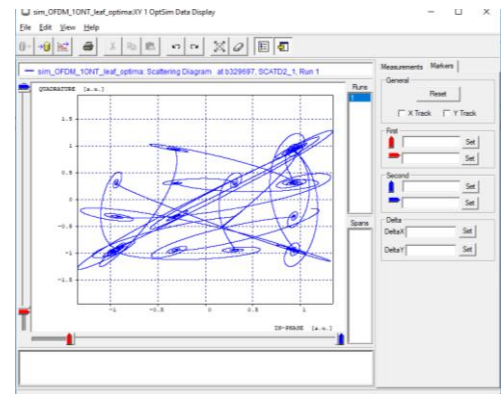
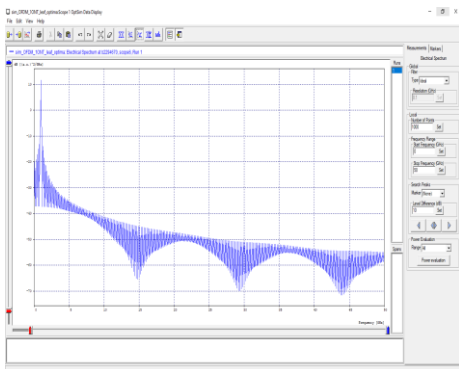


Figura 4.35. a) Señal de video en el Transmisor modulada en 16QAM (dominio de la frecuencia). b) Diagrama constelación Señal de video en el Transmisor modulada a 16QAM.

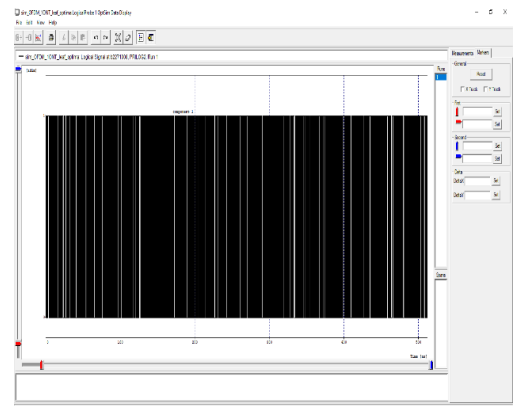
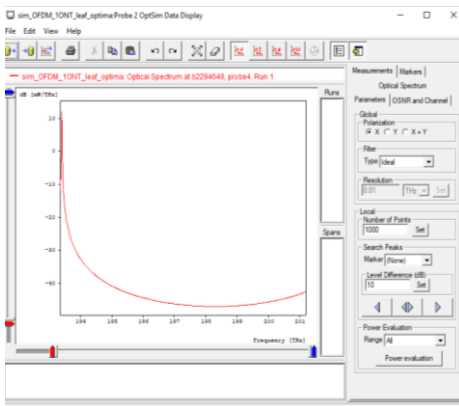


Figura 4.36. a) Portadora Señal de video a 1550 nm (193,4 THz) en el Transmisor en el dominio óptico. b) Señal de la Fuente de datos en el Transmisor RoF a 10 Gbps.

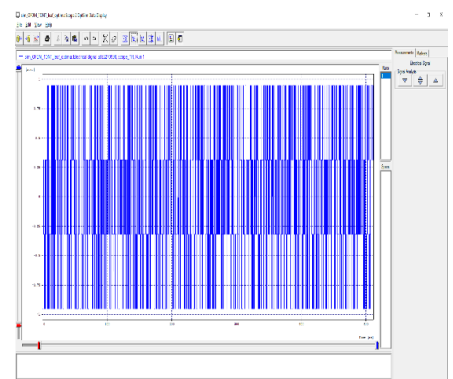
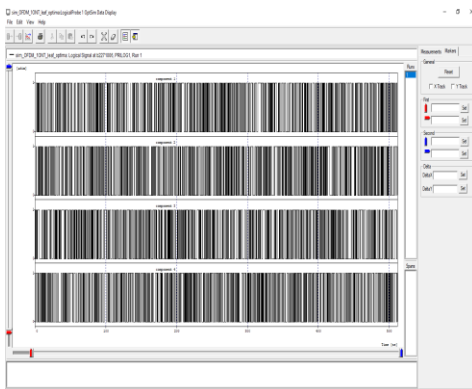


Figura 4.37. a) Señal de la Fuente de datos en el Transmisor RoF en paralelo a 2,5 Gbps cada una. b) Señal de la Fuente de datos en el Transmisor RoF modulada en 16QAM.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

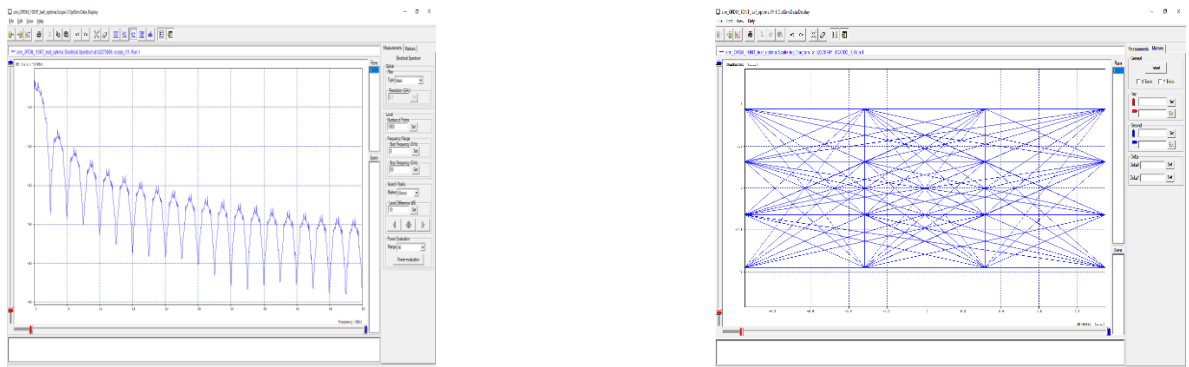


Figura 4.38. a) Señal de la Fuente de datos en el Transmisor RoF modulada en 16QAM dominio frecuencia. b) Diagrama de constelación Señal de la Fuente de datos en el Transmisor RoF modulada en 16QAM.

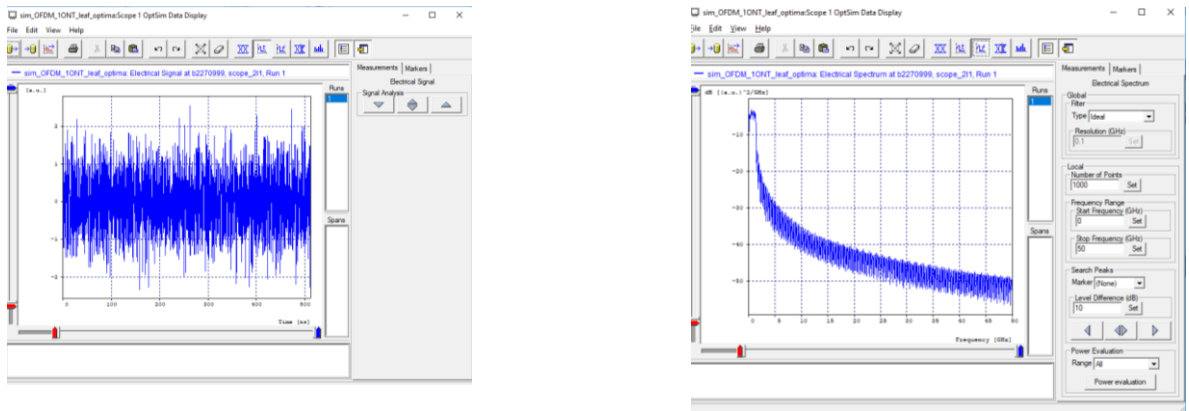


Figura 4.39. a) Señal OFDM en el Transmisor RoF con 8 subportadoras dominio eléctrico. b) Señal OFDM en el Transmisor RoF con 8 subportadoras en el dominio frecuencia.

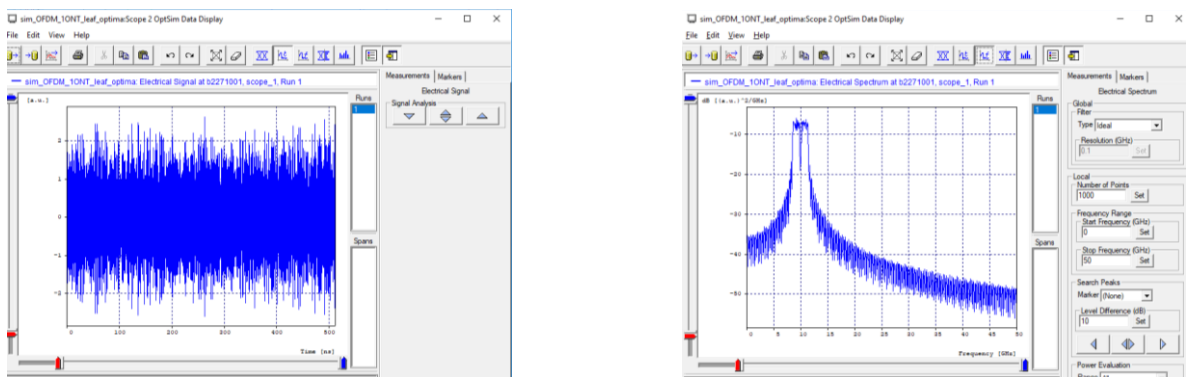


Figura 4.40. a) Señal OFDM en el Transmisor RoF a 10 GHz en el dominio tiempo. b) Señal OFDM en el Transmisor RoF a 10GHz en el dominio frecuencia.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

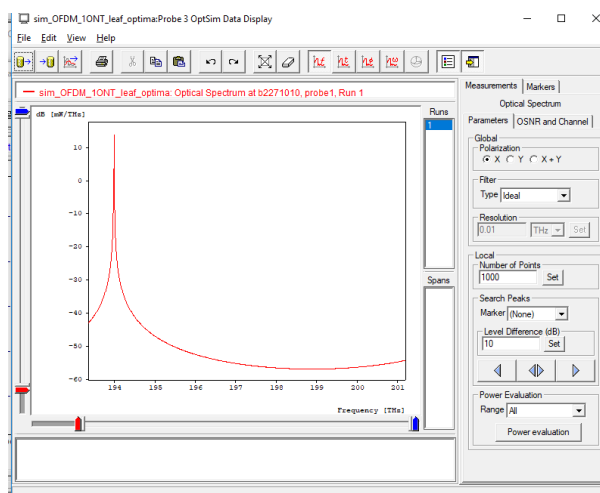


Figura 4.41. Señal OFDM en la portadora óptica en el Transmisor RoF en 194THz.

Uno de los impactos más importantes que se tiene al integrar el módulo RoF diseñado a la red FTTH-GPON arroja que, el análisis realizado al módulo RoF sólo, obtuvo una distancia máxima de 5,860 Km desde el transmisor hasta el receptor, correspondiente a un EVM del 14,87726% representando una BER máxima de 10^{-3} . Cuando se integró este módulo RoF a la red FTTH-GPON *Triple Play* existente, el EVM en el receptor RoF disminuyó a 14,33258%, lo cual mejora la BER en una pequeña cantidad. Esta mejora de parámetro permitió obtener una ganancia en la distancia la red FTTH-GPON *Quad Play* ya consolidada, pasando de 5,860 Km a 5,887 Km (17 m de mejoría). Por lo anterior, se fijó la nueva distancia para la red FTTH-GPON con el módulo RoF integrado en 5,887 Km. En cuanto a los otros servicios *Triple Play* (voz/datos y video) su desempeño no varía con respecto al análisis realizado anteriormente. En conclusión, al integrar el módulo RoF a una red FTTH-GPON *Triple Play* se tiene una ganancia de unos metros de distancia entre la OLT y la ONT.

Introduciéndose ahora a las señales en el canal óptico, en las figuras 4.42(a) y 4.42(b) se puede observar las diferentes señales de los cuatros servicios de la red FTTH-GPON cuando ingresan al canal óptico (figura 4.42(a)) y antes de entrar al splitter del receptor (figura 4.42(b)); entonces, las diferentes señales sufren una atenuación de casi 9 dB cada una debido a las características de la fibra, los moduladores MZM (para los servicios de voz/datos y video) y EAM (para el servicio de radio), los combinadores y splitters que se utilizan en el tramo óptico. Se puede observar la presencia de otras señales espurias en las frecuencias de 196 THz a 200THz que son señales de ruido pero que no afectan en gran escala a las diferentes señales que transportan los servicios, ya que su potencia es casi despreciable en comparación con las señales de interés, por lo que con un filtro para cada servicio en la ONT se eliminan, manteniendo una buena relación señal a ruido.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

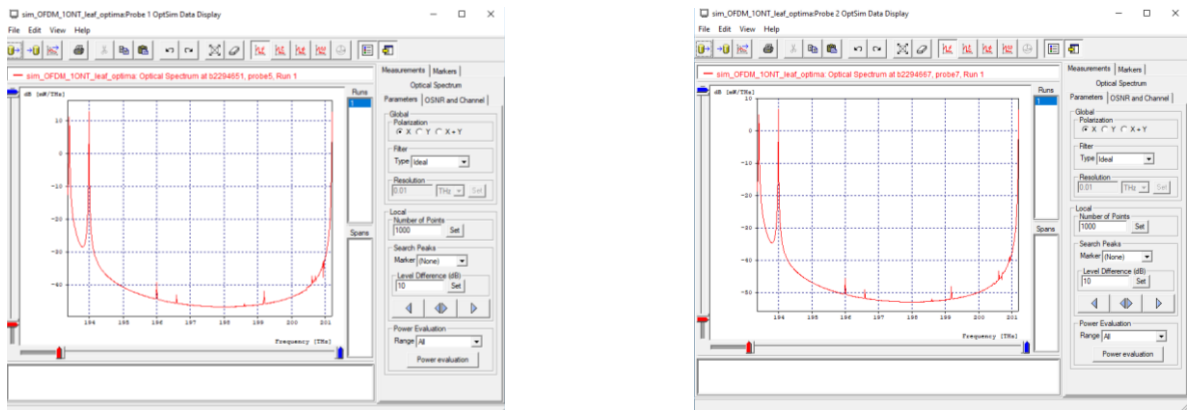


Figura 4.42. a) Señales Quad Play (voz/datos, video y radio) ingresando al canal óptico. b) Señales Quad Play (voz/datos, video y radio) saliendo del canal óptico.

Por último, es pertinente continuar con el análisis de la señal de voz/datos, video y radio de la parte de recepción.

En las figuras 4.43 a 4.45 se observa el comportamiento de la señal de voz/datos en el dominio eléctrico, en la figura 4.43 se aprecia la señal todavía en el dominio óptico después de salir del filtro pasa banda (frecuencia de 201,2 THz). Si se compara con la figura 4.42 se observa que la señal se ha atenuado nuevamente debido a los 300 m de más que la señal ha recorrido (2 dB de atenuación) y por presencia del filtro que es el que aporta la mayor atenuación de la señal (8 dB aproximadamente). Pero como se ve más adelante, dicho hecho no impide que la señal se pueda recuperar totalmente.

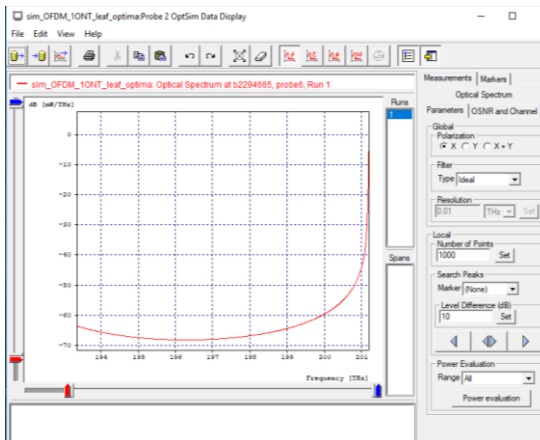


Figura 4.43. Señal datos después del filtro pasa banda en la ONT.

En las gráficas 4.44(a) y 4.44(b) se observa la señal de datos ya recuperada después de pasar del dominio óptico al eléctrico. Si se comparan con las equivalentes en transmisión, se puede concluir que se conserva la forma de la señal original presentándose una atenuación bastante considerable de casi 90 dB con respecto a los 10 dB del lado del transmisor. En la tabla 4.2 se muestra el resumen de la información mencionada.

Tabla 4.2 Resumen de los parámetros OPM para el servicio de voz y datos.

Parámetros	Valor
BER	10^{-40}
Jitter	0.07443 ns
Factor Q	34.1609 dB
Potencia óptica de la señal en Rx	-15.5 dBm

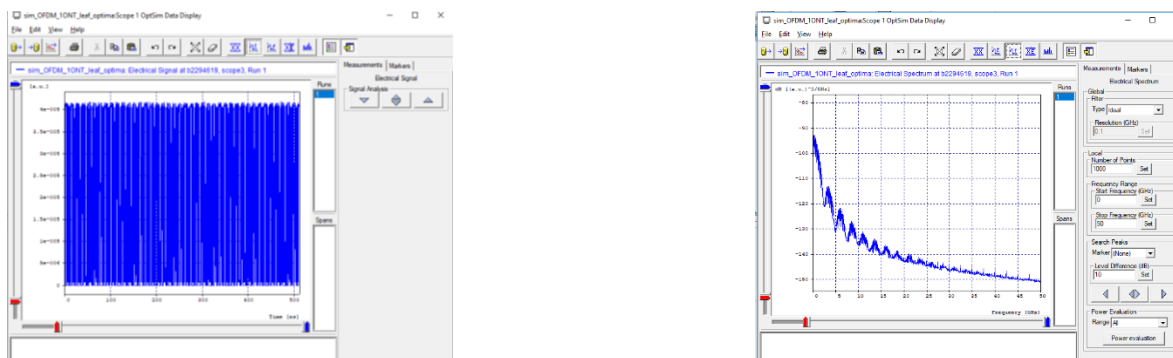


Figura 4.44. a) Señal de voz/datos en el dominio eléctrico temporal. b) Señal de voz/datos en el receptor en el dominio de la frecuencia.

En la figura 4.45 se observa el diagrama del ojo que presenta una buena apertura tanto en el eje x como en el eje y, lo cual indica que los datos se están recuperando de manera eficiente, prácticamente no hay presencia de jitter (0.07443ns) y se tiene una excelente BER (10^{-40}) indicando que no hay pérdida de información (factor Q de 34.1609dB).

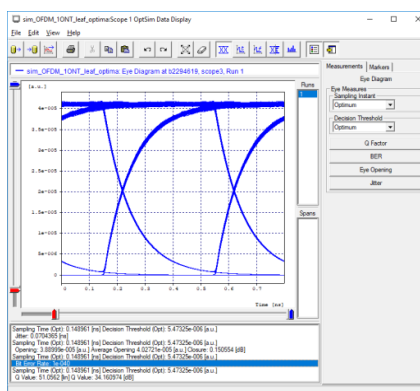


Figura 4.45. Diagrama del ojo para la señal de voz/datos.

Por su parte, el análisis del servicio de video por comparación con la parte de transmisión arroja que en la figura 4.46 se observa la señal de video en el dominio óptico después del filtro pasa banda; se aprecia una pérdida de potencia que oscila alrededor de los 9 dB aproximadamente debido a las características de la fibra óptica,

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

el combinador y el modulador MZM. Además, el filtro introduce una atenuación de casi 3 dB en conjunto con la fibra de 300 m, pero en recepción la señal de video presenta una BER aceptable que está dentro de los rangos establecidos de acuerdo a lo que se menciona en [42] [45].

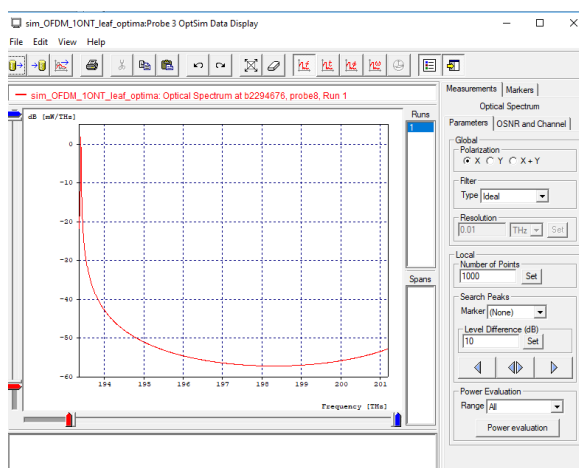


Figura 4.46. . Señal óptica de video después del filtro en la ONT.

En la figura 4.47(a) se observa el diagrama del ojo de la señal de video, presentando una buena apertura, la presencia de jitter es baja y hay un factor de calidad aceptable. En la tabla 4.3 se resumen dicha información.

Tabla 4.3 Resumen de los parámetros OPM para el servicio de video.

Parámetros	Valor
BER	3.69857×10^{-7}
Jitter	0.916861 ns
Factor Q	13.7831 dB
Potencia óptica de la señal en Rx	-15.5 dBm

En la figura 4.47(b) se observa el diagrama de constelación de la señal de video. Por comparación con la parte de transmisión, se aprecia que el diagrama está rotado casi 60 grados con respecto al eje Y. Los puntos de la constelación conservan casi la misma forma que en el transmisor lo que indica que la señal se puede recuperar satisfactoriamente lo cual es congruente con el diagrama del ojo y con los resultados mostrados en [42] [45]; esta rotación en el diagrama de constelación se debe a la falta de coincidencia de fase entre la señal recibida y la señal portadora de referencia.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

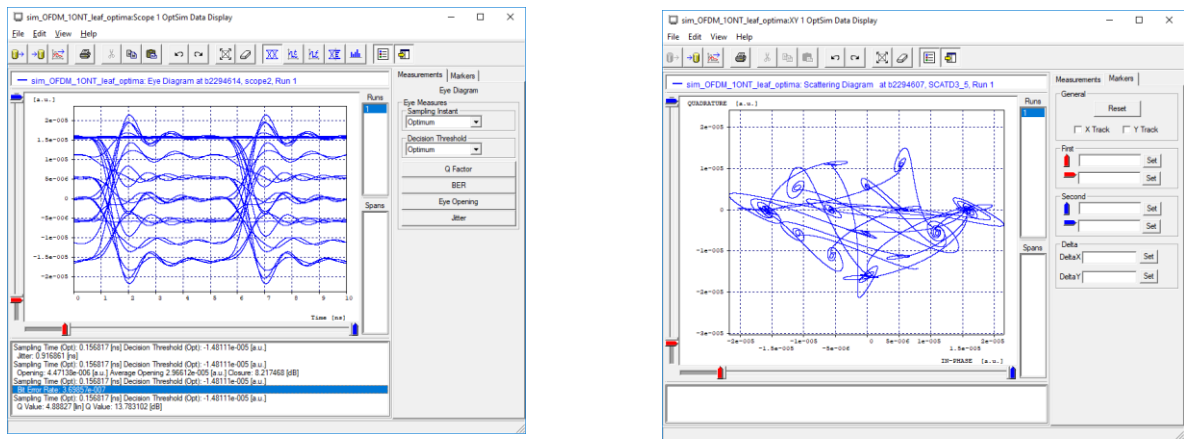


Figura 4.47. a) Diagrama del ojo de la señal de video. b) Diagrama de constelación de la señal de video.

Finalmente, el análisis del servicio de radio-telefonía celular- por comparación con la parte de transmisión arroja que, en la figura 4.48(a) se observa la potencia de la señal óptica que lleva la señal OFDM después de que pasa el filtro, la cual tiene una potencia de 5 dB aproximadamente. Como su potencia era de 15 dB, está indicando que la señal se atenuó 10 dB aproximadamente principalmente por las características de la fibra, el modulador EAM, el filtro pasa banda, los combinadores y splitters. La figura 4.48(b) muestra la señal de radio en el dominio del tiempo. A pesar de todo, la señal de radio frecuencia se puede recuperar con una calidad aceptable.

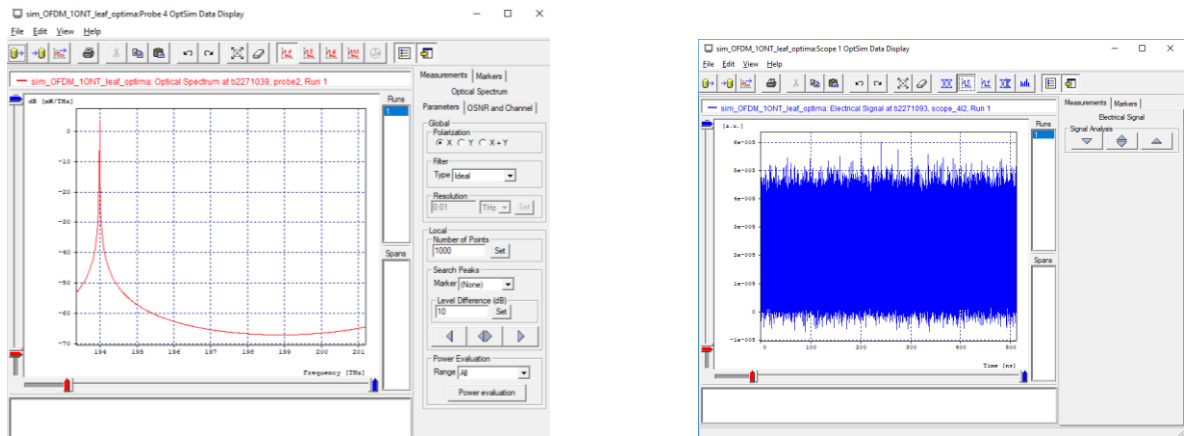


Figura 4.48. a) Señal OFDM en la portadora óptica después del filtro. b) Señal Radio OFDM en el dominio del tiempo.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

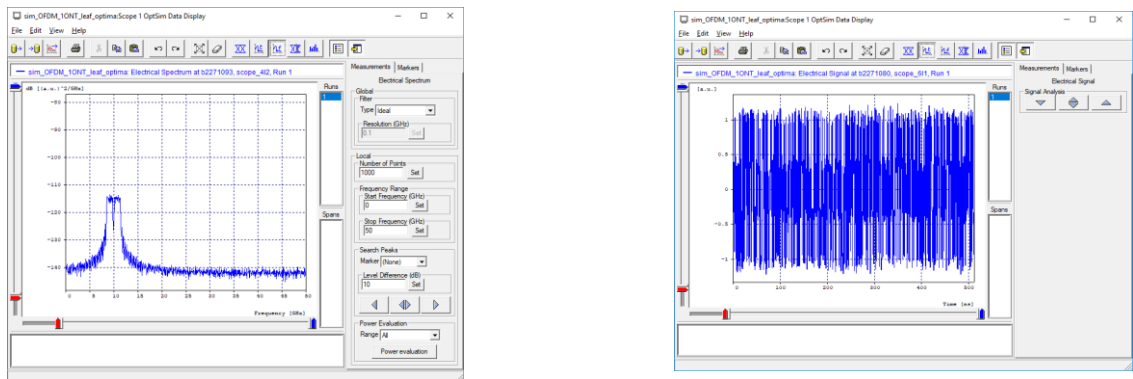


Figura 4.49. a) Señal OFDM en el dominio de la frecuencia. b) Señal de radio después del módulo FFT en el dominio del tiempo.

En las figuras 4.49(a) y 4.49(b) se aprecia el comportamiento de la señal OFDM tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia en el receptor. Se observa que corresponde a una señal OFDM tal y como se muestra en [8] [31] [48], lo que indica que se está recuperando de manera adecuada. Ahora, si se compara con la señal del lado del transmisor, se observa que la señal sufre una atenuación bastante considerable de alrededor de 109 dB (potencia en el transmisor -6dB, potencia en el receptor -115dB), a pesar de que las subportadoras se mantienen en la frecuencia central de los 10GHz.

Para poder realizar una correcta recuperación de la señal de radio en la ONT, fue necesario realizar una amplificación de la señal durante el proceso de conversión de alta frecuencia a banda base (lo hace el módulo de la transformada rápida de Fourier FFT), con esto se logra una señal muy parecida a la del transmisor (OLT) en cuanto a potencia y forma de la señal, garantizando de esta manera poder recuperar la información correctamente. Lo anterior se puede visualizar en la figura 4.50(a) apreciando claramente que tienen el mismo comportamiento al hacer el contraste entre Tx y Rx. Además, en la figura 4.50(a) se observa la señal en banda base demodulada en 16QAM y su respectivo diagrama de constelación aparece en la figura 4.50(b).

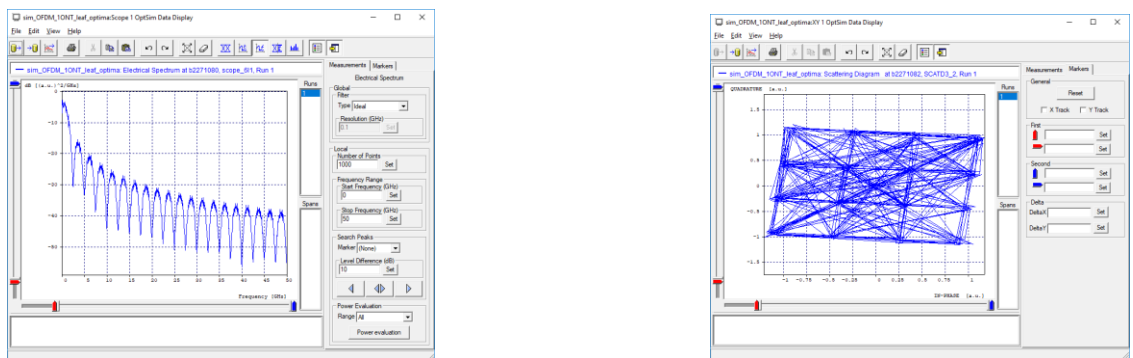


Figura 4.50. a) Señal de radio después del módulo FFT en el dominio de la frecuencia. b) Diagrama en fase y cuadratura después del módulo FFT.

En la figura 4.50(b) se observa el diagrama en fase y cuadratura de la señal de radio, el cual aparece de forma similar comparado con el de la OLT, conservando la forma de una constelación 16QAM, lo que indica que los

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

símbolos o información se están recuperando de manera correcta. Lo anterior se puede corroborar también con los dos parámetros de desempeño que son: el EVM que tiene un valor del 14.87% correspondiendo con una BER de 10^{-3} , que según [31] es la máxima BER aceptable en una señal de radio. Se evidencia también una ligera rotación del diagrama que, como se dijo anteriormente para el servicio de video, es debido a la falta de coincidencia de fase entre la señal recibida y la señal portadora de referencia. En las figuras 4.51(a) y 4.51(b) se observa la señal totalmente recuperada y que corresponde a la entregada por la fuente en la OLT, verificando nuevamente que el proceso de recuperación de la señal se realizó satisfactoriamente en la ONT. En la tabla 4.4 se resumen la información sobre la señal de radio.

Tabla 4.4 Resumen de los parámetros OPM para el servicio de radio-telefonía celular- independiente.

Parámetros	Valor
EVM	14,87%
BER	10^{-3}
Factor Q	9.8 dB
Potencia señal Rx óptica	-15.5 dBm

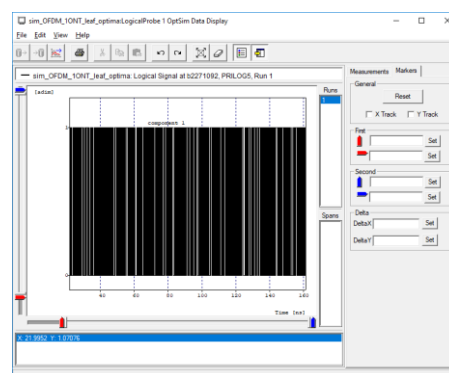
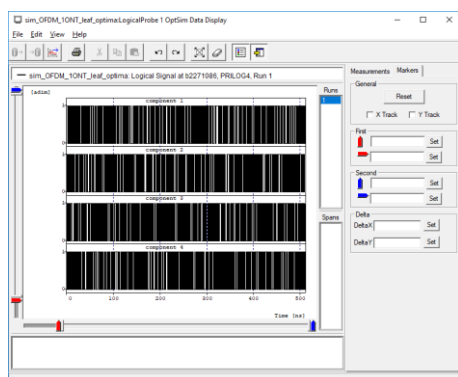


Figura 4.51. a) Señal de radio después del demodulador (paralelo). b) Señal de radio totalmente recuperada (serie).

4.1.2. Impacto cuando se integra el módulo RoF a la red FTTH-GPON.

Aquí se enuncian los principales efectos que se tiene al introducir el módulo RoF a la red FTTH-GPON en términos de los parámetros de desempeño OPM a nivel físico en cada uno de sus servicios; para ello cabe notar que el parámetro distancia se dejará fijo con la distancia máxima alcanzada por el módulo RoF.

Antes de realizar esta comparación, tal y como se enunció anteriormente, uno de los principales impactos que se tuvo al integrar el módulo de RoF a la red FTTH-GPON fue una mejora en el EVM de la señal de radio lo que implicó una mejor BER, logrando de esta manera alcanzar 17 m adicionales en el enlace de fibra óptica. En la tabla 4.5 se resume dicha información.

Tabla 4.5 Resumen de los parámetros OPM para el servicio de radio-telefonía celular- integrado a la red FTTH-GPON

Parámetros	Valor
BER	10^{-3}
EVM	14,87726%
Factor Q	9.8 dB
Potencia señal Rx óptica	-16.192 dBm o 0.24×10^{-01} mW o 7 dB(mW/THz)
Potencia señal Tx óptica	-6.006 dB o 0,251 mW o 16 dB(mW/THz)

En la tabla 4.6 se resumen los parámetros más importantes para el servicio de voz/datos.

Tabla 4.6 Resumen de los parámetros OPM para el servicio de voz/datos.

Parámetros	Valor FTTH-GPON <i>Triple Play</i>	Valor FTTH-GPON <i>Quad Play</i>
BER	10^{-40}	10^{-40}
Jitter	0.0722493 ns	0.0704364 ns
Factor Q	34.160974 dB	34.291544 dB
Potencia señal Rx óptica	6dB(mW/THz)	6dB(mW/THz)
Potencia señal Tx óptica	16dB(mW/THz)	16dB(mW/THz)

Como se puede observar en la tabla 4.6, el integrar el módulo RoF sobre la red FTTH-GPON *Triple Play* si tiene una ligera incidencia sobre la señal de datos en cuanto a los parámetros Jitter y factor Q; es decir, mientras el jitter disminuye en 0,0018129 ns, el cual indica una mejora de este parámetro evitando así una interferencia entre símbolos, el factor Q también disminuye en un factor 0,23057 dB que indica una pequeña disminución en la BER, porque que estos dos parámetros están inversamente relacionados (ver relación en Anexos). Las potencias se mantienen en la misma proporción de atenuación. En conclusión, al integrar el módulo RoF a la red FTTH-GPON se genera un bajo impacto sobre el servicio de voz/datos, por lo que ese servicio no se afecta en gran medida. Lo anterior se puede verificar con los diagramas de ojo que se muestran en las figuras 4.52(a) y 4.52(b).

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

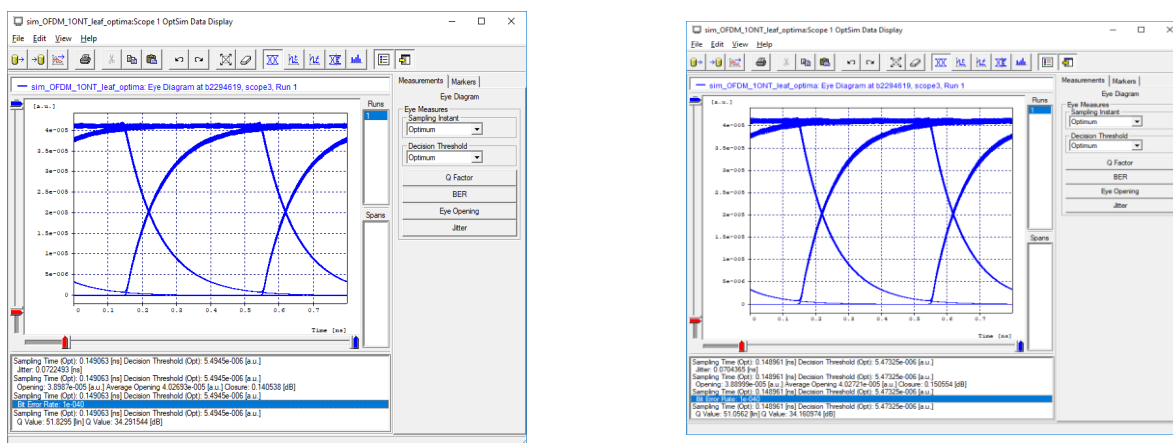


Figura 4.52. a) Diagrama del ojo red FTTH-GPON-sin RoF servicio de voz/datos. b) Diagrama del ojo red FTTH-GPON con RoF servicio de voz/datos.

En la tabla 4.7 se resumen los parámetros más importantes para el servicio de video.

Tabla 4.7 Resumen de los parámetros OPM para el servicio de video.

Parámetros	Valor FTTH-GPON <i>Triple Play</i>	Valor FTTH-GPON <i>Quad Play</i>
BER	$4.19633 \cdot 10^{-7}$	$3.69857 \cdot 10^{-7}$
Jitter	1.19911 ns	0.916861 ns
Factor Q	13.783102 dB	13.924103 dB
Potencia señal Rx óptica	10dB(mW/THz)	4dB(mW/THz)
Potencia señal Tx óptica	20dB(mW/THz)	14dB(mW/THz)

Como se puede observar en la tabla 4.7 el integrar el módulo RoF a la red FTTH-GPON, impacta de manera positiva sobre el servicio de video ya que se mejora (disminuye) la BER en un factor de 0.049473×10^{-6} , lo que indica que el factor Q mejora (aumenta) en 0,141 dB también ya que estos dos están estrechamente relacionados (ver Anexos); por su parte, el jitter presenta una mejoría de 0.282249 ns. Lo anterior se puede apreciar los diagramas de ojo que se muestran en la figura 4.53(a) y 4.53(b). La atenuación de las potencias mantiene el mismo factor de 10dB (entre Tx y Rx), por lo que se puede concluir que el módulo RoF impacta de manera positiva en el desempeño de la señal de video.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

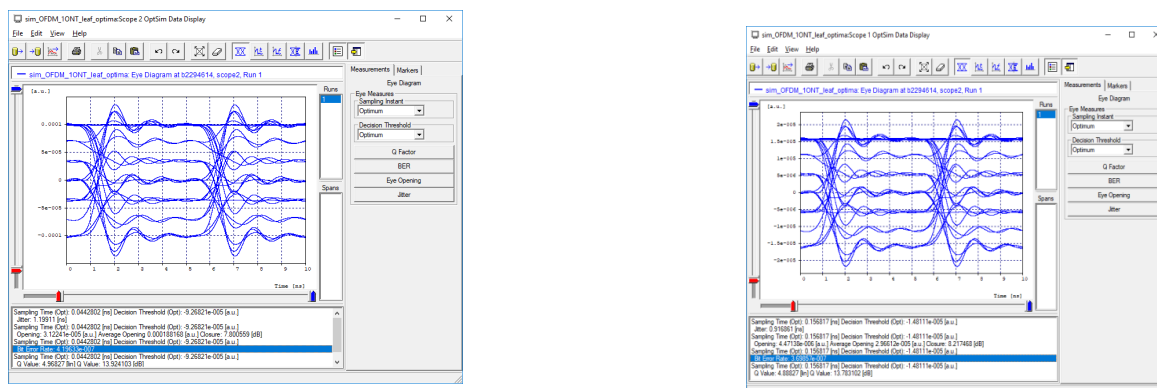


Figura 4.53. a) Diagrama del ojo red FTTH-GPON-sin RoF servicio de video. b) Diagrama del ojo red FTTH-GPON con RoF servicio de video.

En la tabla 4.8 se resumen los parámetros más importantes para este servicio de radio-telefonía celular.

Tabla 4.8 Resumen de los parámetros OPM para el servicio de radio-telefonía celular.

Parámetros	Valor Modulo RoF (independiente)	Valor red FTTH-GPON <i>Quad Play</i>
EVM	14.81868%	14.87726%
BER	0.9545×10^{-3}	0.9926×10^{-3}
Factor Q	9.8385 dB	9.8060 dB
Potencia señal Rx óptica	-15.5 dBm	-16.192 dBm
Distancia Fibra <i>SMF-28</i>	1,250 Km	1,267 Km
Distancia Fibra <i>CorningLEAF</i>	5,860 Km	5,887 Km

El impacto que se tiene al integrar el módulo RoF sobre la red FTTH-GPON no solamente es positivo sobre los servicios *Triple Play* de la red, sino que también impacta de manera positiva sobre el módulo RoF, ya que mejora su EMV, implicando una mejor BER lo que permite ganar unos metros de más (17 m) en la red de acceso.

Continuando con el análisis de la red FTTH-GPON *Quad Play* variando la distancia análogamente a lo indicado en la tabla 4.1.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

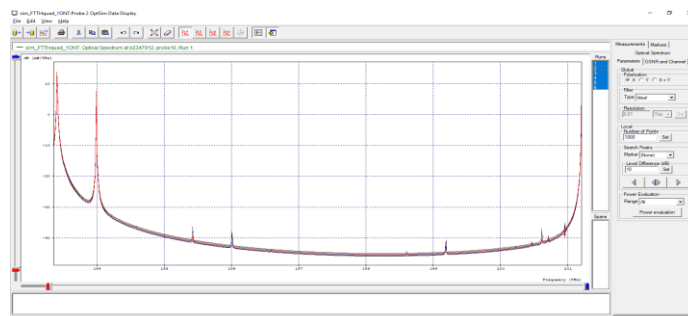


Figura 4.54. Espectro de frecuencias canal óptico para los cuatro servicios de la red FTTH-GPON.

Como se aprecia en la figura 4.54 cuando se varía la distancia desde 1 Km hasta 5,887 Km la potencia de la señal se mantiene casi constante, la atenuación es muy mínima, esto debido a que se está trabajando con distancias cortas correspondiente a una red de acceso, por lo que los servicios no se afectarán en gran escala.

Para el análisis de la señal de voz/datos, en la figura 4.55(a) se tiene la relación BER versus distancia, en donde se puede apreciar que la BER permanece casi constante, lo que indica que no hay un cambio evidente en esta a medida que se varía la distancia, esto por tratarse de distancias cortas en donde la señal no se ve tan afectada. Además, en la figura 4.55(b) se muestra la potencia de recepción en función de la variación de la distancia, observándose la variación de la potencia de la señal de datos a medida que la distancia varía. Como se puede apreciar dicha variación no es muy grande, sólo cambia en 1,5 dB aproximadamente, verificando una vez más que la señal no se afecta en gran medida cuando se varían distancias, esto por tratarse de una red de acceso, en donde las distancias son consideradas pequeñas como “solución de última milla o kilómetro (0-6 Km)”. Lo anterior se puede constatar con los diferentes diagramas del ojo (ver figura 4.56) en donde se observa que su variación no es significativa, sus aperturas son amplias garantizando una buena recepción de la señal.

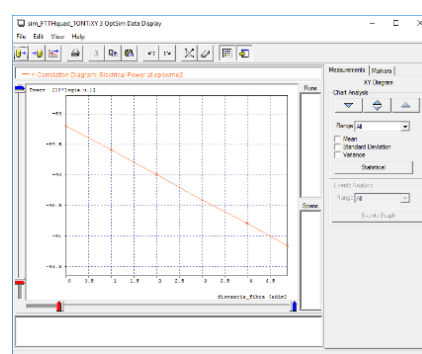
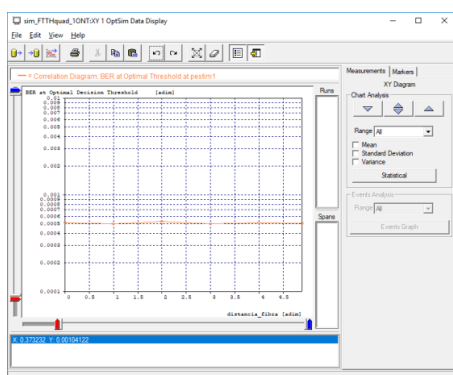


Figura 4.55. a) BER vs distancias para la señal de voz/datos. b) Relación de potencia vs distancia para la señal de voz/datos.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

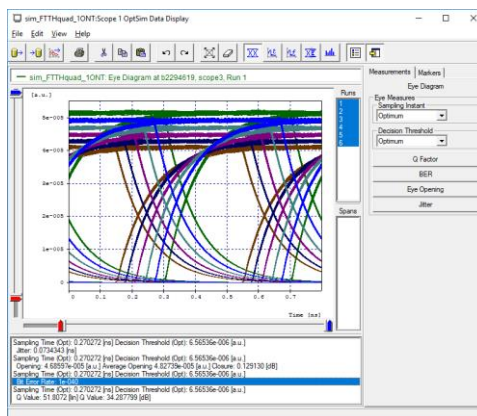


Figura 4.56. Diagramas de ojo servicio de voz/datos en función de la distancia.

Por su parte, el análisis de la señal de video indica que en la figura 4.57(a) se aprecia el desempeño de la señal de video en la red FTTH-GPON con el módulo RoF a diferentes distancias, se observa que la variación de los diagramas de ojo no es tan significativa, por lo que su BER, jitter, factor Q y sus aperturas tienden a mantenerse constantes, y así la señal no se degrada de manera significativa entre 1 y 5,887 Km. Esto se puede verificar también si se observa la figura 4.67(b) mostrando la relación potencia versus distancia donde se atenúa alrededor de 2 dB de manera lineal.

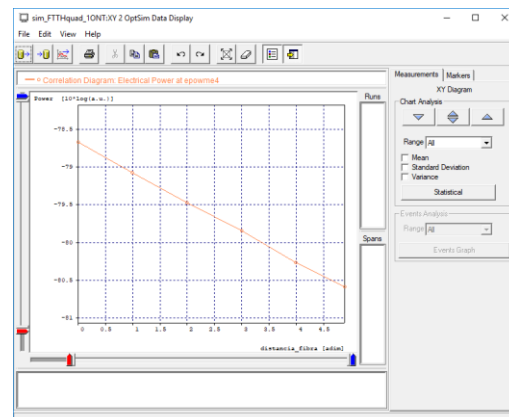
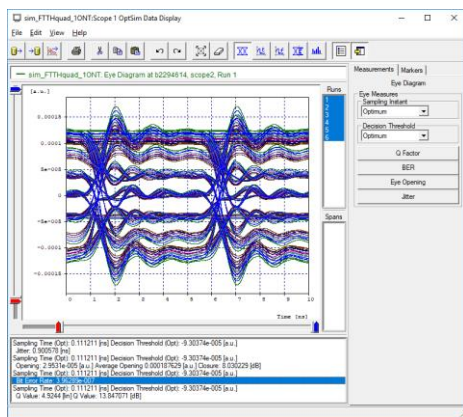


Figura 4.57. a) Diagramas de ojo para la señal de video en función de la distancia. b) Relación Potencia vs Distancia señal de video en función de la distancia.

Concluyendo con el análisis de la señal de radio, así mismo se realizan las gráficas de los parámetros físicos OPM, como se observa en las figuras 4.58, 4.59(a) y 4.59(b). Ahí se evidencia la variación de los principales parámetros de la señal de radio OFDM en la red FTTH-GPON *Quad Play* donde se muestra que el EVM va creciendo hasta llegar a su valor máximo correspondiente a una BER de 10^{-3} en función de la variación de la distancia entre 1 y 5,887 km.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

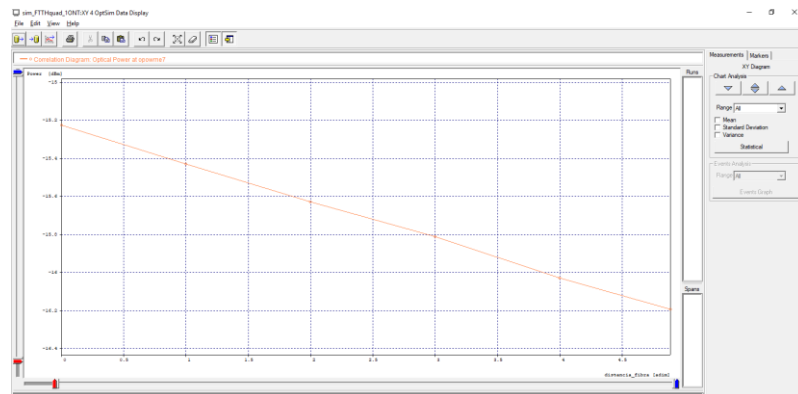


Figura 4.58. Potencia versus distancia para el servicio de radio-telefonía celular.

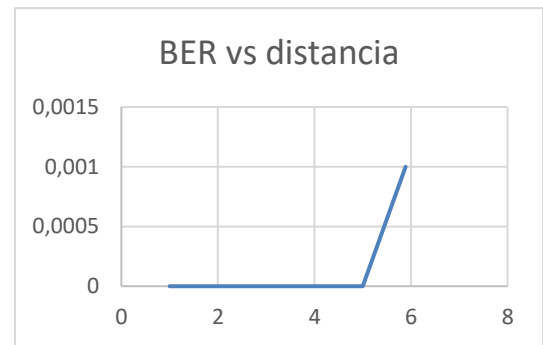
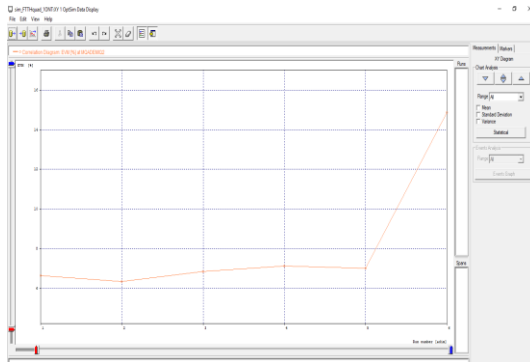


Figura 4.59. a) EVM vs distancia para señal de radio. b) BER vs distancia para señal de radio.

Como conclusión, se tiene que al integrar el módulo RoF a la red FTTH-GPON, el impacto sobre los diferentes parámetros de desempeño es positivo para las diferentes distancias, cuando se compara con la red FTTH-GPON sin el módulo ROF, confirmando una vez más lo concluido anteriormente.

La tabla 4.9 muestra un resumen sobre la comparación del desempeño de los servicios de la red FTTH-GPON *Triple Play* vs *Quad Play* para una sola ONT de referencia.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

Tabla 4.9 Comparación del desempeño de los servicios de la red FTTH-GPON *Triple Play* vs *Quad Play* para una sola ONT de referencia.

Servicio	Parámetros	Valor FTTH-GPON <i>Triple Play</i> (sin el módulo RoF)	Valor FTTH-GPON <i>Quad Play</i> (con el módulo RoF)
Voz/datos	BER	10 ⁻⁴⁰	10 ⁻⁴⁰
	Factor Q	34,160974 dB	34,291544 dB
	Potencia Rx óptica	-16.1 dBm	-15.5 dBm
Video	BER	4,19633 x 10 ⁻⁷	3,69857 x 10 ⁻⁷
	Factor Q	13,783102 dB	13.924103 dB
	Potencia Rx óptica	-16.1 dBm	-15.5 dBm
Radio	EVM	14,81868% *	14,87726%
	BER	0,9545x10 ⁻³ *	0.9926x10 ⁻³
	Potencia Rx óptica	-15.5 dBm *	-16.192 dBm
Fibra SMF-28	Distancia	1,250 Km	1,267 Km
Fibra CorningLEAF	Distancia	5,860 Km	5,877 Km
*Estos datos corresponden al módulo RoF independiente antes de ser integrado a la red FTTH-GPON <i>Triple Play</i>			

De la tabla 4.9, se deduce que el impacto de la integración del módulo RoF a una red FTTH-GPON *Triple Play* existente, mejora el desempeño de los servicios de voz/datos y video. Además, existe una ganancia de 17 m cuando se compara el desempeño del servicio de radio ya integrado a la red (consolidando la red FTTH-GPON *Quad Play*) con respecto a la operación del módulo RoF independiente.

4.2. Escenarios de Simulación para varias ONT.

Para el caso de una sola ONT ya se definió la distancia máxima alcanzada (5,887 Km) para el peor caso de operación que se demostró que está limitado por el módulo de RoF (BER igual a 10^{-3}), la cual se usa como referencia para realizar de una forma análoga un monitoreo completo de los cuatro servicios tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, con el fin de adquirir los resultados de los escenarios de simulación correspondientes al caso de varias ONT. Para una red FTTH-GPON en el contexto actual es suficiente operar con 64 ONT en DWDM; aunque se podría aumentar a 128 ONT con servicios *Quad Play* dependiendo de la cantidad de información que se requiera transportar, para lo cual se podría aumentar el número de canales (disminuyendo el espaciamiento entre ellos) y/o la velocidad de transmisión de datos (incrementando la capacidad de información).

Además, cabe notar que los parámetros de simulación (frecuencia, longitud de onda, ONT, constante de atenuación y constante de dispersión) usados en los escenarios de una sola ONT para la fibra *CorningLEAF* se mantienen constantes para que puedan usarse dentro de estos escenarios variando el número de ONT y la distancia, los cuales constan de varias portadoras de radio inyectadas a la fibra simultáneamente, además de las dos portadoras que siempre están presentes (portadora de Internet/VoIP y portadora de CATV digital), las cuales van tomando valores dentro del espectro óptico para la ventana de 1550 nm en DWDM de acuerdo a un plan de frecuencias, con el fin de proceder a observar y analizar los parámetros de medida de acuerdo a los resultados obtenidos (EVM, SNR, BER, y Distancia Máxima Alcanzada). Es importante aclarar que el número y valor de longitudes de onda están asignadas por el plan de frecuencias que se muestra en la tabla 4.10.

Tabla 4.10 Distribución de Canales (DWDM) para los servicios *Quad Play* en la red FTTH-GPON.

ONT	f [THz]	λ [nm]
ONT_video	193,414489	1550
1	193,6	1548,5148
2	193,7	1547,7153
3	193,8	1546,9167
4	193,9	1546,1189
5	194	1545,3219
6	194,1	1544,5258
7	194,2	1543,7305
8	194,3	1542,936
9	194,4	1542,1423
10	194,5	1541,3494
11	194,6	1540,5573
12	194,7	1539,7661
13	194,8	1538,9757
14	194,9	1538,186
15	195	1537,3972
16	195,1	1536,6092
17	195,2	1535,822
18	195,3	1535,0356
19	195,4	1534,25
20	195,5	1533,4653
21	195,6	1532,6813
22	195,7	1531,8981
23	195,8	1531,1157
24	195,9	1530,3341
25	196	1529,5534
26	196,1	1528,7734
27	196,2	1527,9942
28	196,3	1527,2158
29	196,4	1526,4382
30	196,5	1525,6614
31	196,6	1524,8853
32	196,7	1524,1101
33	196,8	1523,3357
34	196,9	1522,562

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

35	197	1521,7891
36	197,1	1521,017
37	197,2	1520,2457
38	197,3	1519,4752
39	197,4	1518,7055
40	197,5	1517,9365
41	197,6	1517,1683
42	197,7	1516,4009
43	197,8	1515,6343
44	197,9	1514,8684
45	198	1514,1033
46	198,1	1513,339
47	198,2	1512,5755
48	198,3	1511,8127
49	198,4	1511,0507
50	198,5	1510,2895
51	198,6	1509,529
52	198,7	1508,7693
53	198,8	1508,0104
54	198,9	1507,2522
55	199	1506,4948
56	199,1	1505,7381
57	199,2	1504,9822
58	199,3	1504,2271
59	199,4	1503,4727
60	199,5	1502,7191
61	199,6	1501,9662
62	199,7	1501,2141
63	199,8	1500,4628
64	199,9	1499,7121
ONT_datos/voz	201,20299	1490

La tabla 4.10 muestra la distribución de los canales cuando se escala el número de los mismos; es decir cuando se inyecten a la fibra simultáneamente: 2 canales (ONT1– ONT2), 4 canales (ONT1– ONT4), 8 canales (ONT1– ONT8), 16 canales (ONT1– ONT2), 32 canales (ONT1– ONT32) y 64 canales (ONT1– ONT64).

Es importante aclarar que en las figuras 4.60 a 4.65 se muestran los modelos correspondientes a los escenarios de simulación usando varias ONT, donde es pertinente mencionar que los transmisores (OLT) y receptores

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

(ONT) están plasmados como agrupación en modo componente (caja negra) tomando como referencia el modelo detallado que se usó para una sola ONT.

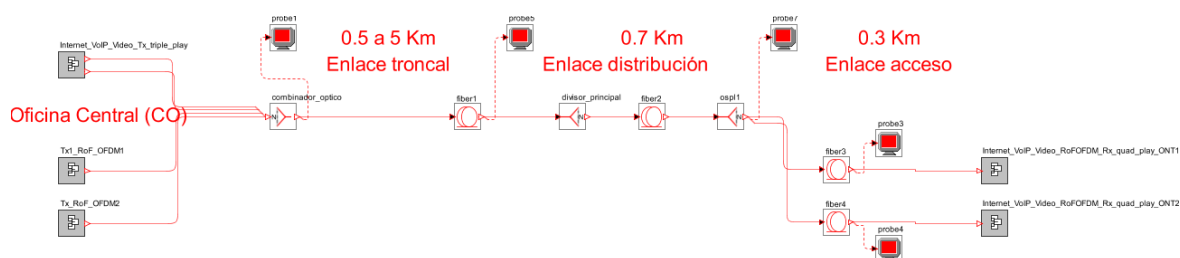


Figura 4.60. . Modelo general del sistema FTTH-GPON *Quad Play* para 2 ONT.

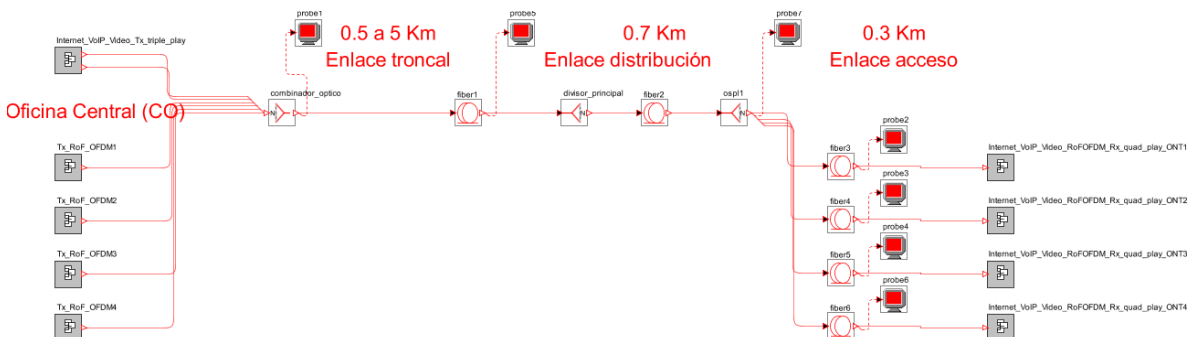


Figura 4.61. Modelo general del sistema FTTH-GPON *Quad Play* para 4 ONT.

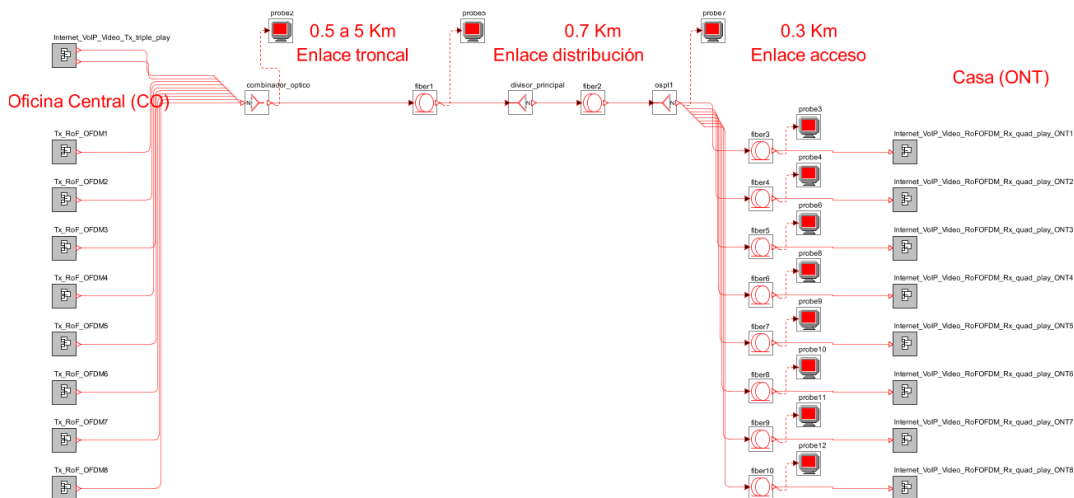


Figura 4.62. Modelo general del sistema FTTH-GPON *Quad Play* para 8 ONT.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

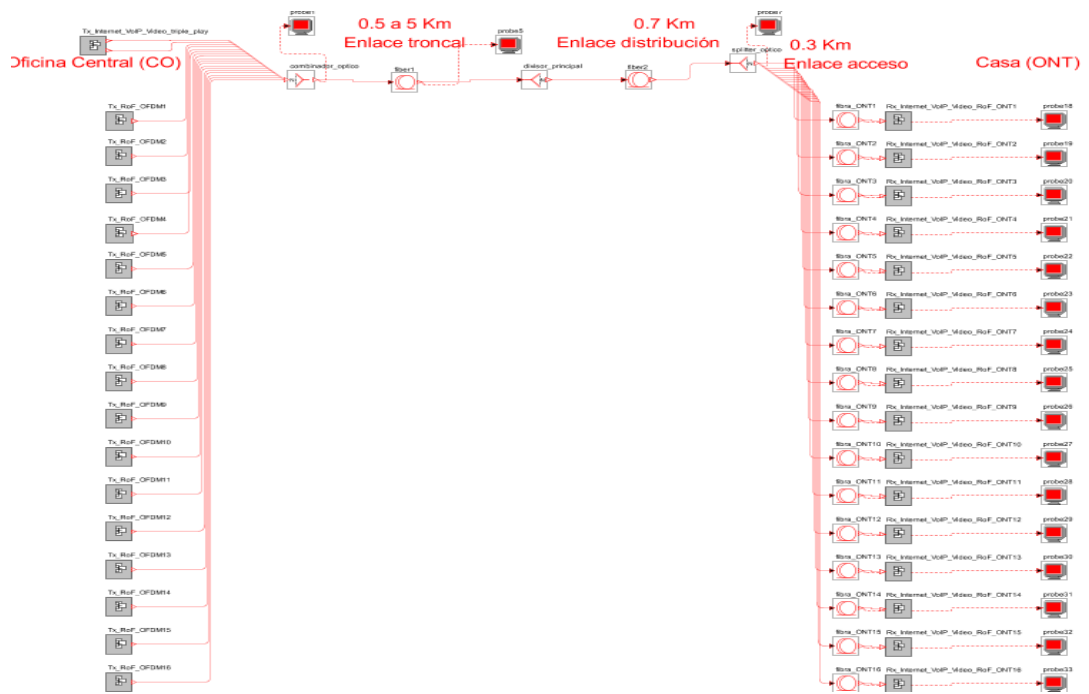


Figura 4.63. Modelo general del sistema FTTH-GPON Quad Play para 16 ONT.

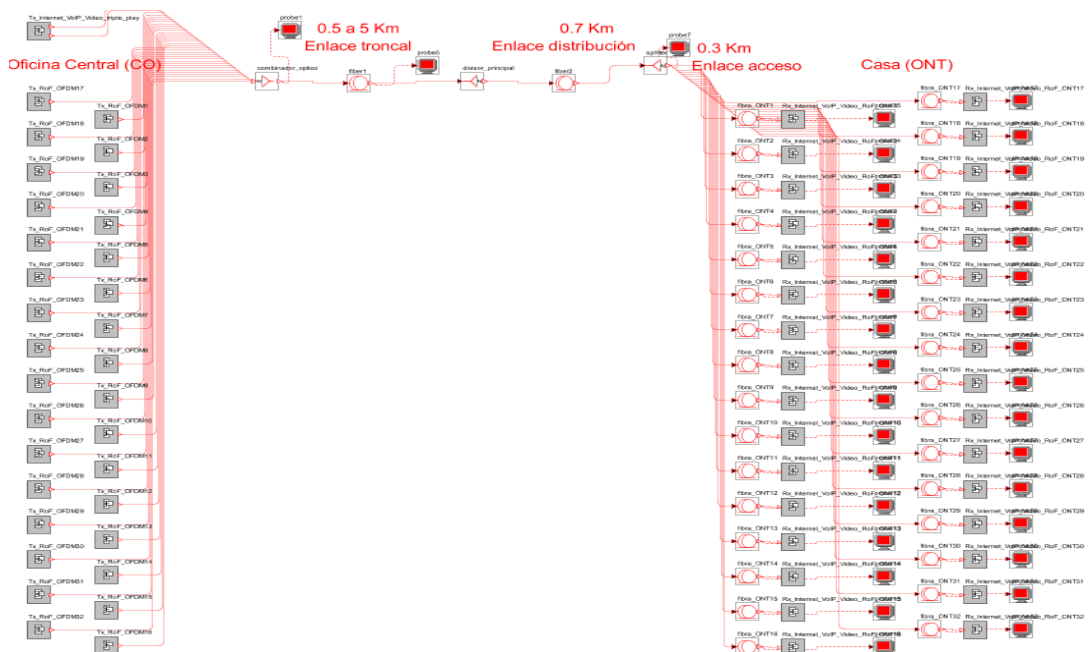


Figura 4.64. Modelo general del sistema FTTH-GPON Quad Play para 32 ONT.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

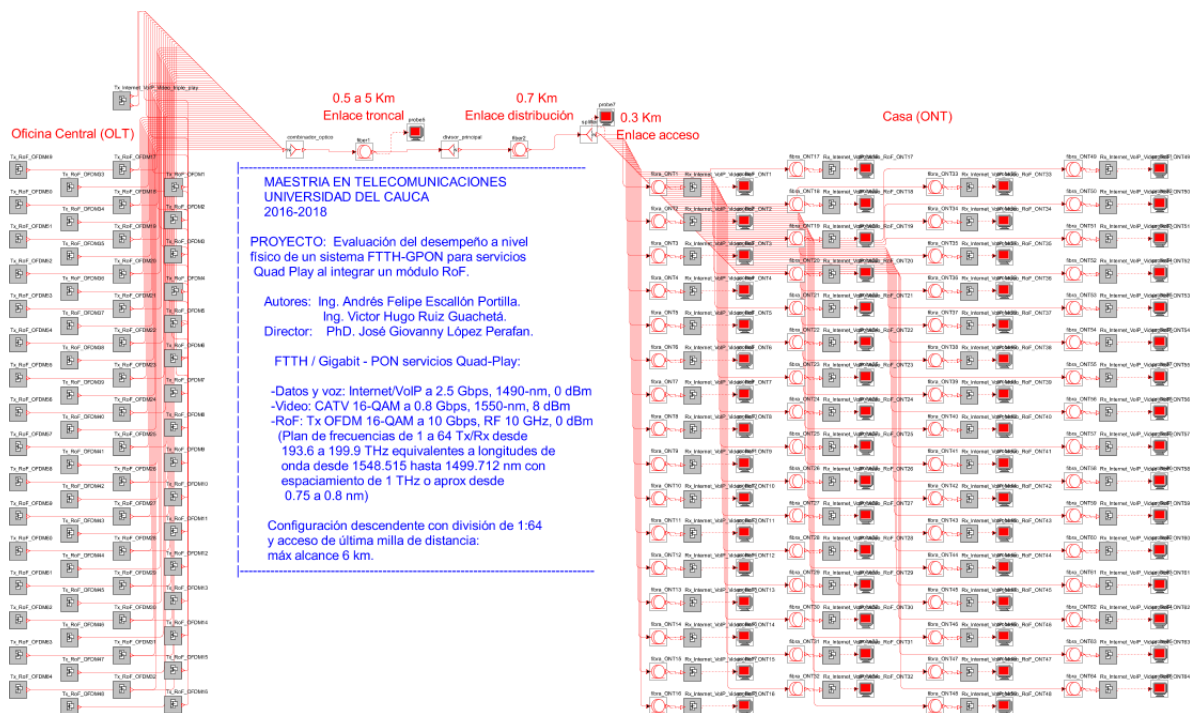


Figura 4.65. Modelo general del sistema FTTH-GPON Quad Play 64 ONT.

A continuación, se muestran los resultados totales correspondientes a las pruebas realizadas para el caso de varias ONT. Se empieza con la referencia que sería una ONT y se continua con 2 canales, indicando los resultados del monitoreo respectivo sin variar la distancia (es decir, dejando constante la distancia máxima alcanzada de referencia que corresponde a 5,887 Km) y dejando todo lo demás constante, pasando de manera similar al mismo proceso con 4, 8, 16, 32 y 64 canales, como se observa en las tablas 4.11 a 4.17, extrayendo algunas conclusiones generales de cada tabla. Con la distancia máxima fija de 5,887 Km, dichas tablas sirven de referencia para tenerlas en cuenta cuando se varíe la distancia más adelante.

Tabla 4.11 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON *Quad Play* para una ONT (Distancia constante).

ONT	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lineal]	BER (con SNR [lineal])	BER (aprox)	DISTANCIA [Km]
1	14,8773	16,5495	45,180818	0,000992589	0,9926 E-03	5,887

La tabla 4.11 es un resumen de lo que ya se había analizado anteriormente para el caso de una sola ONT; es decir, corresponde a la evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF actuando solamente una portadora de radio.

Ahora se procede a realizar la evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF cuando ya están actuando simultáneamente 2, 4, 8, 16, 32 y 64 ONT. Cabe aclarar que para cada ONT le corresponde un módulo RoF, por lo que cada señal de radio se monta sobre una portadora óptica.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

Tabla 4.12 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON *Quad Play* para 2 ONT (Distancia constante).

ONT	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lineal]	BER (con SNR [lineal])	BER (aprox)		DISTANCIA [Km]
1	6,84651	23,2906	213,334453	2,43381E-11			5,887
2	7,30567	22,7268	187,3612	3,47713E-10			5,887

Según los resultados de la tabla 4.12, cuando las primeras 2 portadoras de radio (ONT1-ONT2 de acuerdo con el plan de frecuencias de la tabla 4.10 están presentes junto con las portadoras de datos/voz (ONT_voz/datos) y video (ONT_video), el desempeño de sistema conjunto mejoró debido a la interferencia constructiva. Es decir, en concordancia con el EVM obtenido para una sola ONT, se redujo del 14.87% al 7.31% en el peor de los casos ocurrido en la ONT2, lo cual implica que la BER mejoró pues pasó del orden de 10^{-3} a 10^{-10} .

Tabla 4.13 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON *Quad Play* para 4 ONT (Distancia constante).

ONT	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lineal]	BER (con SNR [lineal])	BER (aprox)		DISTANCIA [Km]
1	6,72154	23,4506	221,341218	1,07371E-11			5,887
2	7,88506	22,0639	160,838411	5,30339E-09			5,887
3	7,23929	22,8061	190,813198	2,44075E-10			5,887
4	8,41281	21,5012	141,292255	3,98063E-08			5,887

Según los resultados de la tabla 4.13, cuando las primeras 4 portadoras de radio (ONT1- ONT4 de acuerdo con el plan de frecuencias de la tabla 4.10 están presentes junto con las portadoras de voz/datos (ONT_voz/datos) y video (ONT_video), el desempeño de sistema conjunto mejoró debido a la interferencia constructiva. Es decir, en concordancia con el EVM obtenido para una sola ONT, se redujo del 14.87% al 8.41% en el peor de los casos ocurrido en la ONT4, lo cual implica que la BER mejoró pues pasó del orden de 10^{-3} a 10^{-8} .

Tabla 4.14 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON *Quad Play* para 8 ONT (Distancia constante).

ONT	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lineal]	BER (con SNR [lineal])	BER (aprox)		DISTANCIA [Km]
1	7,92698	22,0178	159,141997	6,31546E-09			5,887
2	7,41031	22,6033	182,107402	5,96032E-10			5,887
3	7,16832	22,8917	194,609981	1,65406E-10			5,887
4	8,87402	21,0376	126,986894	1,74957E-07			5,887
5	16,0644	15,8827	38,7501765	0,002014181	2,01418	E-03	5,887
6	21,9493	13,1716	20,756792	0,015600426	15,6004	E-03	5,887
7	21,9335	13,1779	20,7867076	0,015545408	15,5454	E-03	5,887
8	14,98	16,4898	44,5632599	0,001062006	1,06201	E-03	5,887

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

En concordancia con el plan de frecuencias de la tabla 4.10, cuando las primeras 8 portadoras de radio (ONT1-ONT8) están presentes junto con las portadoras de voz/datos y video, el desempeño de sistema conjunto empeoró debido a la interferencia destructiva (efecto negativo de la diafonía y de las no linealidades de la fibra). Es decir, para el peor de los casos ocurrido en la ONT6, el EVM se incrementó del 14.87% al 21.95%, lo cual implica que la BER empeoró pues pasó de 1×10^{-3} a 15.6×10^{-3} , según se muestra en la tabla 4.14. Lo anterior, entorpece el desempeño general del sistema, para lo cual se debe ajustar la distancia (reduciéndola) con el fin de garantizar los cuatro servicios en todas las ONT presentes.

Tabla 4.15 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON *Quad Play* para 16 ONT (Distancia constante).

ONT	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lineal]	BER (con SNR [lineal])	BER (aprox)		DISTANCIA [Km]
1	6,88882	23,2371	210,72203	3,1791E-11			5,887
2	7,44731	22,56	180,30205	7,17353E-10			5,887
3	7,71674	22,2513	167,93176	2,55635E-09			5,887
4	12,5638	18,0176	63,351353	0,000139318	0,13932	E-03	5,887
5	22,1606	13,0884	20,362739	0,016344558	16,3446	E-03	5,887
6	22,8776	12,8118	19,106426	0,018977028	18,977	E-03	5,887
7	16,5978	15,599	36,299577	0,002644148	2,64415	E-03	5,887
8	15,7868	16,0341	40,124648	0,001730168	1,73017	E-03	5,887
9	22,9521	12,7835	18,982526	0,019259878	19,2599	E-03	5,887
10	51,7051	5,72934	3,7405351	0,145153582	145,154	E-03	5,887
11	80,9819	1,83225	1,5248408	0,217794174	217,794	E-03	5,887
12	80,0495	1,93282	1,560567	0,216144826	216,145	E-03	5,887
13	54,382	5,2909	3,38135	0,154077788	154,078	E-03	5,887
14	57,1098	4,86579	3,0660464	0,162593255	162,593	E-03	5,887
15	36,9839	8,63975	7,310963	0,084968091	84,9681	E-03	5,887
16	39,8231	7,9973	6,3056565	0,098038898	98,0389	E-03	5,887

En concordancia con el plan de frecuencias de la tabla 4.10, cuando las primeras 16 portadoras de radio (ONT1-ONT16) están presentes junto con las portadoras de voz/datos y video, el desempeño de sistema conjunto empeoró debido a la interferencia destructiva (efecto negativo de la diafonía y de las no linealidades de la fibra). Es decir, para el peor de los casos ocurrido en la ONT12, el EVM se incrementó del 14.87% al 80.05%, lo cual implica que la BER empeoró pues pasó de 1×10^{-3} a 216.1×10^{-3} , según se muestra en la tabla 4.15. Lo anterior, entorpece el desempeño general del sistema, para lo cual se debe ajustar la distancia (reduciéndola) con el fin de garantizar los cuatro servicios en todas las ONT presentes.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios Quad Play al integrar un módulo RoF

Tabla 4.16 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON Quad Play para 32 ONT (Distancia constante).

ONT	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lineal]	BER (con SNR [lineal])	BER (aprox)		DISTANCIA [Km]
1	7,70135	22,2687	168,603512	2,38575E-09			5,887
2	8,08124	21,8504	153,124445	1,17395E-08			5,887
3	8,60857	21,3014	134,939056	7,67784E-08			5,887
4	11,343	18,9054	77,7214819	3,02229E-05			5,887
5	23,2646	12,6661	18,476021	0,020463413	20,46341	E-03	5,887
6	19,5804	14,1636	26,0828804	0,00838971	8,38971	E-03	5,887
7	20,0496	13,9579	24,8764598	0,009641949	9,641949	E-03	5,887
8	15,1432	16,3956	43,6077932	0,001179259	1,179259	E-03	5,887
9	22,2671	13,0467	20,1685117	0,016724986	16,72499	E-03	5,887
10	50,2533	5,97671	3,95977791	0,140066046	140,066	E-03	5,887
11	85,2238	1,38878	1,37682331	0,224908351	224,9084	E-03	5,887
12	97,7418	0,19839	1,04674102	0,242729533	242,7295	E-03	5,887
13	60,1941	4,40892	2,75988964	0,171566489	171,5665	E-03	5,887
14	47,152	6,53	4,49779419	0,128587511	128,5875	E-03	5,887
15	41,1548	7,7116	5,90418072	0,10394469	103,9447	E-03	5,887
16	46,3421	6,6805	4,65639181	0,125449111	125,4491	E-03	5,887
17	64,1396	3,85747	2,43078809	0,182117373	182,1174	E-03	5,887
18	92,6913	0,65923	1,16391837	0,23605028	236,0503	E-03	5,887
19	302,101	-9,60303	0,10957123	0,330868295	330,8683	E-03	5,887
20	282,545	-9,02176	0,1252632	0,327838486	327,8385	E-03	5,887
21	189,276	-5,54191	0,27913153	0,304956966	304,957	E-03	5,887
22	111,171	-0,91986	0,8091217	0,257805906	257,8059	E-03	5,887
23	87,4942	1,16042	1,30629682	0,228471102	228,4711	E-03	5,887
24	145,716	-3,27014	0,47096227	0,284592556	284,5926	E-03	5,887
25	164,137	-4,30411	0,37118345	0,294474445	294,4744	E-03	5,887
26	110,609	-0,87583	0,81736627	0,257242013	257,242	E-03	5,887
27	132,283	-2,43007	0,57146888	0,27574039	275,7404	E-03	5,887
28	100,143	-0,01245	0,99713816	0,245693716	245,6937	E-03	5,887
29	177,683	-4,99292	0,31674353	0,300479768	300,4798	E-03	5,887
30	203,069	-6,15286	0,24250127	0,309635174	309,6352	E-03	5,887
31	98,8968	0,09636	1,02243559	0,24417116	244,1712	E-03	5,887
32	139,653	-2,90099	0,51274414	0,280797045	280,797	E-03	5,887

De acuerdo con el plan de frecuencias de la tabla 4.10, cuando las primeras 32 portadoras de radio (ONT1-ONT32) están presentes junto con las portadoras de voz/datos y video, el desempeño de sistema conjunto

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios Quad Play al integrar un módulo RoF

empeoró debido a la interferencia destructiva (efecto negativo de la diafonía y de las no linealidades de la fibra). Es decir, para el peor de los casos ocurrido en la ONT19, el EVM se incrementó del 14.87% al 302.10%, lo cual implica que la BER empeoró pues pasó de 1×10^{-3} a 330.9×10^{-3} , según se muestra en la tabla 4.16. Lo anterior, entorpece el desempeño general del sistema, para lo cual se debe ajustar la distancia (reduciéndola) con el fin de garantizar los cuatro servicios en todas las ONT presentes.

Tabla 4.17 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON Quad Play para 64 ONT (Distancia constante).

ONT	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lineal]	BER (con SNR [lineal])	BER (aprox)		DISTANCIA [Km]
1	7,99531	21,9433	156,43336	8,34759E-09			5,887
2	8,37301	21,5424	142,63837	3,46383E-08			5,887
3	8,97352	20,9407	124,18662	2,33917E-07			5,887
4	9,88957	20,0965	102,24573	2,29638E-06			5,887
5	16,2919	15,7606	37,675422	0,002269084	2,26908	E-03	5,887
6	22,6183	12,9108	19,546964	0,018006354	18,0064	E-03	5,887
7	19,3614	14,2612	26,676245	0,007836883	7,83688	E-03	5,887
8	15,4591	16,2163	41,844008	0,00143144	1,43144	E-03	5,887
9	20,2042	13,8911	24,497116	0,010074625	10,0746	E-03	5,887
10	31,8869	9,92775	9,8350111	0,060287407	60,2874	E-03	5,887
11	63,1271	3,99569	2,5093949	0,179503379	179,503		5,887
12	81,2092	1,8079	1,5163161	0,218191451	218,191	E-03	5,887
13	81,8102	1,74385	1,4941198	0,219232739	219,233	E-03	5,887
14	44,3789	7,05646	5,0774581	0,117596551	117,597	E-03	5,887
15	38,0197	8,39982	6,9180257	0,089808005	89,808	E-03	5,887
16	53,2652	5,47113	3,5246286	0,150425067	150,425	E-03	5,887
17	47,4022	6,48402	4,450433	0,12954519	129,545	E-03	5,887
18	96,9344	0,27045	1,0642521	0,241703397	241,703	E-03	5,887
19	146,528	-3,3184	0,4657563	0,285078211	285,078	E-03	5,887
20	89,5404	0,95962	1,2472731	0,23154726	231,547	E-03	5,887
21	343,312	-10,714	0,0848441	0,336133954	336,134	E-03	5,887
22	167,401	-4,4752	0,3568472	0,29600745	296,007	E-03	5,887
23	142,687	-3,0877	0,4911693	0,282734798	282,735	E-03	5,887
24	73,3433	2,69279	1,8589993	0,203259308	203,259	E-03	5,887
25	180,824	-5,1451	0,3058358	0,30174773	301,748	E-03	5,887
26	119,306	-1,5333	0,7025424	0,265416017	265,416	E-03	5,887
27	44,8523	6,96431	4,9708578	0,119521853	119,522	E-03	5,887
28	182,845	-5,2417	0,2991113	0,302541403	302,541	E-03	5,887
29	209,025	-6,4039	0,2288786	0,311469004	311,469	E-03	5,887
30	30,7852	10,2332	10,551572	0,05486597	54,866	E-03	5,887
31	117,429	-1,3955	0,7251845	0,263746544	263,747	E-03	5,887

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

32	174,855	-4,8535	0,3270743	0,299300112	299,3	E-03	5,887
33	127,4	-2,1034	0,6161189	0,272086499	272,086	E-03	5,887
34	126,914	-2,0702	0,6208457	0,271708495	271,708	E-03	5,887
35	104,542	-0,3858	0,9149926	0,250803349	250,803	E-03	5,887
36	143,294	-3,1246	0,4870162	0,283113147	283,113	E-03	5,887
37	160,598	-4,1148	0,3877214	0,292745002	292,745	E-03	5,887
38	192,308	-5,68	0,2703989	0,306041403	306,041	E-03	5,887
39	149,488	-3,4921	0,4474935	0,286805782	286,806	E-03	5,887
40	144,644	-3,206	0,4779677	0,283943642	283,944	E-03	5,887
41	102,701	-0,2315	0,9480979	0,248712534	248,713	E-03	5,887
42	121,304	-1,6775	0,6795899	0,267139989	267,14	E-03	5,887
43	148,016	-3,4062	0,4564395	0,28595482	285,955	E-03	5,887
44	173,043	-4,7631	0,3339577	0,298525087	298,525	E-03	5,887
45	80,6667	1,86611	1,5367779	0,217240299	217,24	E-03	5,887
46	157,357	-3,9377	0,4038588	0,291095349	291,095	E-03	5,887
47	114,592	-1,1831	0,7615377	0,261127453	261,127	E-03	5,887
48	57,433	4,81677	3,0316335	0,163565339	163,565	E-03	5,887
49	200,856	-6,0577	0,2478729	0,308926946	308,927	E-03	5,887
50	110,199	-0,8435	0,8234656	0,256826968	256,827	E-03	5,887
51	172,572	-4,7394	0,3357831	0,298320989	298,321	E-03	5,887
52	207,88	-6,3562	0,2314062	0,311124516	311,125	E-03	5,887
53	195,958	-5,8433	0,2604193	0,307303534	307,304	E-03	5,887
54	112,018	-0,9857	0,7969405	0,258645186	258,645	E-03	5,887
55	101,5	-0,1293	0,970656	0,2473126	247,313	E-03	5,887
56	147,408	-3,3704	0,4602138	0,285598534	285,599	E-03	5,887
57	163,907	-4,2919	0,3722259	0,294364222	294,364	E-03	5,887
58	118,653	-1,4855	0,710306	0,264840165	264,84	E-03	5,887
59	133,234	-2,4923	0,5633424	0,276422368	276,422	E-03	5,887
60	77,3567	2,23004	1,6711048	0,211194054	211,194	E-03	5,887
61	175,36	-4,8786	0,3251932	0,299513421	299,513	E-03	5,887
62	192,92	-5,7075	0,2686868	0,306256159	306,256	E-03	5,887
63	95,6926	0,38243	1,0920512	0,240095215	240,095	E-03	5,887
64	85,9765	1,3124	1,3528211	0,226107576	226,108	E-03	5,887

De acuerdo con el plan de frecuencias de la tabla 4.10, haciendo uso prácticamente de todo el ancho de banda óptico DWDM, cuando todas las 64 portadoras de radio (ONT1-ONT64) están presentes junto con las portadoras de voz/datos y video, el desempeño de sistema conjunto empeoró debido a la interferencia destructiva (efecto negativo de la diafonía y de las no linealidades de la fibra). Es decir, para el peor de los

casos ocurrido en la ONT21, el EVM se incrementó del 14.87% al 343.31%, lo cual implica que la BER empeoró pues pasó de 1×10^{-3} a 336.1×10^{-3} , según se muestra en la tabla 4.17. Lo anterior, entorpece el desempeño general del sistema, para lo cual se debe ajustar la distancia (reduciéndola) con el fin de garantizar los cuatro servicios en todas las ONT presentes.

Para este contexto multicanal, es importante resaltar la importancia por el impacto que tiene la diafonía (cross-talk) óptica en el desempeño del sistema. La diafonía se presenta de forma diferente debido a que las señales son transmitidas por medio de luz, por tanto, en sistemas WDM dicho fenómeno se manifiesta como la perturbación que puede ocasionar interferencia entre una longitud de onda frente a otra, dependiendo de la separación que exista entre ellas (interferencia de los canales). En el suplemento 39 a las Recomendaciones UIT-T de la serie G “*Consideraciones sobre Diseño e Ingeniería de Sistemas Ópticos*” [18] se usan unas expresiones particulares con el fin de puntualizar los efectos de la diafonía óptica.

Se llama diafonía entre canales a la perturbación que ejercen los canales adyacentes sobre el canal deseado, en otras palabras, según [18], “*es la relación de la potencia total en los canales perturbadores a la del canal deseado*”, aclarando que las longitudes de onda de los canales deseado y adyacentes son diferentes. La diafonía entre canales se produce especialmente debido a la demultiplexación anómala de una señal de transmisión multicanal en sus canales individuales, previamente a la transferencia hacia un conjunto de receptores monocanal. El proceso más nocivo para un canal es cuando su potencia de transmisión se encuentra en el valor mínimo y el resto de los canales contiguos se encuentran en su máximo. Además, es importante resaltar que la penalidad de diafonía también depende de las velocidades binarias relativas de las señales deseada e interferente y de los códigos de línea.

Adicionalmente, en concordancia con la teoría de los efectos no lineales de la fibra óptica que se encuentran en el capítulo 2 y en los anexos del presente trabajo de grado, en el canal de transmisión de los sistemas de radio sobre fibra, aparecen efectos no lineales que influyen directamente en la capacidad de transmisión de las señales, dichos efectos se producen en los materiales dieléctricos cuando son expuestos a campos electromagnéticos de gran intensidad [31]. Los efectos no lineales son efectos acumulativos producto de la interacción de la luz con el material por el cual ésta viaja, resultando en cambios en la onda de luz e interacciones entre ondas de luz.

Según lo expuesto en [9] [31], dentro del contexto de los efectos no lineales de tipo difusión, aun cuando la **Dispersión Estimulada de Brillouin (SBS)** puede ser un factor que afecte a las transmisiones ópticas en los enlaces de Radio sobre fibra, las limitaciones en las comunicaciones usualmente son producidas por otros factores no lineales que se describen más adelante. Por su parte, dentro de la **Dispersión Estimulada de Raman (SRS)**, el coeficiente de ganancia de Raman es casi tres magnitudes menor de lo que es el coeficiente de ganancia de Brillouin, y la potencia umbral de Raman ronda el 1W para sistemas de canal simple, en estos sistemas la potencia umbral más alta hace que la SRS sea un efecto despreciable. En los sistemas DWDM, lo que causaría un menor desempeño debido al cross-talk (diafonía) sería el ocasionado por la degradación del valor de la SNR debido a la SRS. Todo esto indica que la SRS, vendrá a imponer un límite fundamental en la capacidad de transmisión de las futuras redes ópticas de comunicación, sin embargo, el umbral SRS es lo suficientemente elevado en comparación con otros efectos no lineales que limitan las transmisiones ópticas.

En cambio, dentro del contexto de los efectos no lineales de tipo paramétrico, se destaca en general el efecto óptico *Kerr* que se produce debido a que el índice de refracción de las fibras de sílice resulta ser dependiente de la intensidad óptica. Cabe recalcar que, aunque el índice de refracción es una función que depende muy

débilmente de la intensidad óptica, ya no se le puede considerar despreciable actualmente. La modulación de fase debido al índice refractivo dependiente de la intensidad induce otros efectos no lineales, los cuales se mencionan a continuación:

- **Modulación de auto fase (SPM):** debido al índice refractivo dependiente de la intensidad se crean varios efectos no lineales, uno de ellos es la Modulación de Auto Fase (*SPM, Self-Phase Modulation*), la cual provoca un cambio de fase no lineal en una señal determinada mientras que se propaga a través de una fibra óptica. Se denomina modulación de auto fase, puesto que el desplazamiento de fase no lineal es dependiente de su propia forma de pulso. Si la amplitud del espectro es significativa, puede causar interferencias entre canales adyacentes en un sistema DWDM. Incluso en un sistema de canal simple, el espectro ampliado podría causar una ampliación temporal de los pulsos ópticos significativa en presencia de la dispersión cromática.
- **Modulación de fase cruzada (XPM):** el efecto *Kerr* provoca un segundo desplazamiento de fase no lineal, el cual es conocido como Modulación de Fase Cruzada (*XPM, Cross-Phase Modulation*). XPM es un efecto de fase no lineal que se produce debido a los pulsos ópticos en otros canales (canales adyacentes). Por lo tanto, XPM se produce solamente en los sistemas de múltiples canales. El efecto XPM únicamente afecta a las transmisiones de señales cuando los pulsos en los otros canales están sincronizados con la señal que se necesita transmitir. Cuando los pulsos en cada canal viajan a diferentes velocidades de grupo debido a la dispersión, los pulsos se deslizan sobre los otros mientras se propagan, de manera que no afectan a la señal. La distancia de transmisión relativa para que dos pulsos de canales diferentes colisionen entre ellos se llama distancia *walk-off* y depende directamente del ancho del pulso e inversamente del coeficiente de dispersión y la diferencia entre las longitudes de onda de sus portadoras. Cuando el coeficiente de dispersión es elevado (por ejemplo al usar una fibra óptica estándar SMF-28), la distancia *walk-off* es relativamente corta, y la interacción entre los pulsos de canales adyacentes no será significativa, lo que conlleva a un efecto reducido de modulación de fase cruzada. Pero en cambio cuando el coeficiente de dispersión es bajo (tal y como es el caso del presente trabajo de grado al usar una fibra óptica tipo *CorningLEAF*), la distancia *walk-off* es relativamente larga, y la interacción entre los pulsos de canales adyacentes sí será significativa. Sin embargo, la ampliación del espectro debido a la XPM induce a más distorsión temporal de la forma del pulso cuando se tiene una gran dispersión, lo que hace más complicado al efecto de dispersión en la XPM.
- **Mezcla de cuatro ondas (FWM):** un tercer efecto no lineal producido debido al índice refractivo dependiente de la intensidad es el conocido como Mezcla de Cuatro Ondas (*FWM, Four Wave Mixing*), un efecto también conocido como mezcla de cuatro fotones. Este efecto se ve descrito por una interacción paramétrica entre ondas ópticas de manera muy parecida a la distorsión de intermodulación que se produce en los sistemas eléctricos. El efecto FWM igualmente es producido únicamente en sistemas multicanal, en los cuales, los choques entre dos o más canales causa la generación de una o más frecuencias a expensas de la pérdida de potencia de los canales originales. Para explicar claramente el funcionamiento de esta no linealidad se supone que se tiene tres ondas ópticas a frecuencias f_i, f_j y f_k que ingresan al núcleo de una fibra óptica, esto, generará nuevos componentes de frecuencia definidos como $f_{FWM} = f_i + f_j - f_k$. El número de bandas laterales debido a la FWM se incrementa geométricamente de acuerdo a la ecuación:

$$M = \frac{1}{2}(N_{ch}^3 - N_{ch}^2) \quad (4.1)$$

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

Donde M es el número de las bandas laterales creadas, y N es el número de canales.

De la ecuación 4.17 se puede verificar que como para el caso del presente trabajo de grado, si se tienen 64 canales, esto generaría 129024 bandas laterales adicionales, que podrían afectar directamente en los canales con señal óptica útil, es por eso que se hace necesaria una supresión de la mezcla de cuatro señales FWM, para evitar interferencias importantes entre los canales de señal y los componentes de frecuencia FWM.

Los efectos no lineales citados anteriormente, en un sistema real, especialmente en sistemas donde los canales se encuentran muy cercanos entre sí, la ampliación o ensanchamiento del espectro debido a los efectos no lineales resulta usualmente casi despreciable. Las degradaciones en el desempeño del sistema son en general evaluables mediante la solución de la ecuación no lineal de Schrödinger (NLSE) [31].

A continuación, se muestran los resultados totales correspondientes a las pruebas realizadas para el caso de varias ONT. Se empieza con la referencia que sería 1 ONT y se continúa con 2 canales, indicando los resultados del monitoreo respectivo pero ahora variando la distancia (es decir, iniciando desde el caso que garantiza el acceso de último kilómetro hasta alcanzar la máxima distancia en cada caso particular relacionado con el número de ONT empleado) y dejando todo lo demás constante, pasando de manera similar al mismo proceso con 4, 8, 16, 32 y 64 canales, como se observa en las tablas 4.18 a 4.24 (se adicionaron los datos de la potencia óptica en recepción como otro parámetro OPM a tener en cuenta), extrayendo algunas conclusiones generales de cada tabla. Las tablas 4.9 a 4.15 mostradas anteriormente sirvieron de referencia para hacer la proyección de la distancia máxima alcanzada en cada caso de acuerdo a la limitante del servicio de radio-telefonía celular en cuanto al valor máximo de la BER permitido (10^{-3}); es decir, es necesario forzar al sistema para el peor caso de desempeño mínimo aceptable y por tal vía extraer el valor de la máxima distancia alcanzada entre la OLT y las respectivas ONT.

Por lo anterior, tras haber comentado sobre el efecto de las no linealidades de la fibra al aumentar el número de canales, ya es posible cumplir el objetivo de analizar la incidencia de incrementar el número de ONT comparado con la máxima distancia de referencia para una ONT, porque con el fin de mantener el desempeño general del sistema al valor mínimo aceptable, se debe sacrificar la distancia alcanzada entre OLT y ONT, como se muestra desde la tabla 4.18 hasta la 4.24. Porque para el caso de emplear un solo canal, o inclusive dos y hasta cuatro canales, el desempeño del sistema sigue siendo comparativamente el mismo pues no hay sacrificio de distancia (BER en 10^{-3}).

Tabla 4.18 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON *Quad Play* para una ONT (Distancia variable).

ONT	D[Km]	PRxo [dBm]	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lin]	BER (con SNR [lin])	BER (aprox)	
1	1	-15,224	6,644	23,5513	226,535	6,31687E-12		
	2	-15,428	6,3556	23,9368	247,56	7,3937E-13		
	3	-15,627	6,8546	23,2803	212,829	2,56278E-11		
	4	-15,81	7,1299	22,9383	196,713	1,33348E-10		
	5	-16,026	7,0128	23,0822	203,34	6,76587E-11		
	5,887	-16,192	14,887	16,5437	45,1201	0,000999201	0,999	E-03

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

La tabla 4.18 es un resumen de los resultados de desempeño del sistema al variar la distancia desde 1 km hasta 5,887 Km, con incrementos de 1 km entre cada prueba para el caso de una sola ONT; es decir, corresponde a la evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF actuando solamente una portadora de radio, y es congruente con los resultados del peor caso de referencia mostrados en la tabla 4.11.

Ahora, se procede a realizar la evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF cuando ya están actuando simultáneamente 2, 4, 8, 16, 32 y 64 portadoras de radio, teniendo en cuenta que además se va a variar la distancia entre la OLT y ONT.

Tabla 4.19 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON *Quad Play* para dos ONT (Distancia variable).

ONT	D[Km]	PRxo [dBm]	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lin]	BER (con SNR [lin])	BER (aprox)
1	1	-15,221	6,48747	23,7585	237,602	2,04136E-12	
	2	-15,421	7,04515	23,0422	201,474	8,18941E-11	
	3	-15,623	6,73166	23,4376	220,676	1,14918E-11	
	4	-15,816	6,85457	23,2804	212,833	2,56184E-11	
	5	-16,026	6,78208	23,3727	217,408	1,60492E-11	
	5,887	-16,214	6,84651	23,2906	213,334	2,43381E-11	
2	1	-15,215	6,61933	23,5837	228,229	5,31319E-12	
	2	-15,417	7,74453	22,2201	166,728	2,89311E-09	
	3	-15,615	6,65179	23,5412	226,007	6,66635E-12	
	4	-15,83	7,2005	22,8527	192,874	1,97597E-10	
	5	-16,011	7,49922	22,4997	177,815	9,2601E-10	
	5,887	-16,206	7,30567	22,7268	187,361	3,47713E-10	

La tabla 4.19 es un resumen de los resultados de desempeño del sistema al variar la distancia desde 1 km hasta 5,887 Km, con incrementos de 1 km entre cada prueba para el caso de dos ONT; es decir, corresponde a la evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF actuando con dos portadora de radio, y es congruente con los resultados del peor caso de referencia mostrados en la tabla 4.12, donde no hay sacrificio de distancia para este caso porque todavía ni la diafonía ni los efectos no lineales de la fibra son apreciables.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

Tabla 4.20 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON *Quad Play* para cuatro ONT (Distancia variable).

ONT	D[Km]	PRxo [dBm]	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lin]	BER (con SNR [lin])	BER (aprox)
1	1	-15,222	6,85816	23,2758	212,6103	2,62084E-11	
	2	-15,422	6,89859	23,2248	210,126	3,37892E-11	
	3	-15,622	6,76236	23,398	218,677	1,40966E-11	
	4	-15,821	6,86745	23,2641	212,0356	2,77948E-11	
	5	-16,037	6,95443	23,1548	206,7648	4,76544E-11	
	5,887	-16,207	6,72154	23,4506	221,3412	1,07371E-11	
2	1	-15,213	6,66777	23,5204	224,9257	7,44509E-12	
	2	-15,414	6,60501	23,6025	229,2201	4,80198E-12	
	3	-15,616	6,99185	23,1082	204,5578	5,97286E-11	
	4	-15,826	6,60615	23,601	229,1409	4,84099E-12	
	5	-15,999	6,95436	23,1549	206,7691	4,76336E-11	
	5,887	-16,214	7,88506	22,0639	160,8384	5,30339E-09	
3	1	-15,222	6,35775	23,9339	247,396	7,51822E-13	
	2	-15,417	6,8978	23,2258	210,174	3,36237E-11	
	3	-15,624	7,12464	22,9447	197,0038	1,29436E-10	
	4	-15,818	7,06969	23,012	200,078	9,44789E-11	
	5	-15,997	7,26091	22,7802	189,6785	2,74181E-10	
	5,887	-16,194	7,23929	22,8061	190,8132	2,44075E-10	
4	1	-15,22	6,52617	23,7068	234,7921	2,71908E-12	
	2	-15,42	6,3998	23,8767	244,1558	1,04615E-12	
	3	-15,62	6,49243	23,7519	237,2388	2,11836E-12	
	4	-15,821	7,49648	22,5029	177,9447	9,13749E-10	
	5	-16,032	7,58511	22,4008	173,8108	1,39705E-09	
	5,887	-16,228	8,41281	21,5012	141,2923	3,98063E-08	

La tabla 4.20 es un resumen de los resultados de desempeño del sistema al variar la distancia desde 1 km hasta 5,887 Km, con incrementos de 1 km entre cada prueba para el caso de cuatro ONT; es decir, corresponde a la evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF actuando con cuatro portadoras de radio, y es congruente con los resultados del peor caso de referencia mostrados en la tabla 4.13, donde no hay sacrificio de distancia para este caso porque todavía ni la diafonía ni los efectos no lineales de la fibra son apreciables.

Por lo tanto se puede concluir que el desempeño del sistema se mantiene al aumentar el número de canales de 1 a máximo 4, donde no se observa penalidad alguna en distancia.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

Tabla 4.21 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON *Quad Play* para ocho ONT (Distancia variable).

ONT	D[Km]	PRxo [dBm]	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lin]	BER (con SNR [lin])	BER (aprox)	
1	1	-15,211	7,3201	22,7096	186,622	3,75094E-10		
	2	-15,41	7,2772	22,7607	188,828	2,99156E-10		
	3	-15,628	6,9432	23,1688	207,433	4,45047E-11		
	4	-15,815	7,6596	22,3159	170,446	1,97412E-09		
	5	-16,008	8,0204	21,9161	155,457	9,23053E-09		
2	1	-15,22	7,0249	23,0672	202,639	7,26889E-11		
	2	-15,421	6,5823	23,6325	230,808	4,08351E-12		
	3	-15,596	6,9908	23,1094	204,618	5,93623E-11		
	4	-15,796	6,6763	23,5093	224,353	7,8932E-12		
	5	-16,061	7,1666	22,8938	194,705	1,63808E-10		
3	1	-15,208	6,7641	23,3957	218,562	1,42639E-11		
	2	-15,418	6,4633	23,7909	239,379	1,7028E-12		
	3	-15,586	6,7021	23,4758	222,627	9,41546E-12		
	4	-15,806	7,7927	22,1663	164,674	3,5738E-09		
	5	-15,993	7,1021	22,9723	198,257	1,13848E-10		
4	1	-15,221	7,2027	22,8501	192,758	1,99968E-10		
	2	-15,405	6,2805	24,0401	253,519	4,02794E-13		
	3	-15,581	6,4028	23,8726	243,93	1,07057E-12		
	4	-15,83	6,9812	23,1213	205,18	5,60449E-11		
	5	-16,041	7,6402	22,338	171,315	1,80543E-09		
5	1	-15,219	6,5083	23,7307	236,085	2,38296E-12		
	2	-15,421	6,5482	23,6775	233,212	3,19482E-12		
	3	-15,63	7,2246	22,8237	191,59	2,25392E-10		
	4	-15,834	7,0513	23,0346	201,121	8,49087E-11		
	5	-15,991	8,7654	21,1445	130,153	1,26018E-07		
6	1	-15,21	7,0646	23,0182	200,365	9,17436E-11		
	2	-15,406	6,5906	23,6215	230,221	4,33552E-12		
	3	-15,679	8,139	21,7885	150,957	1,46792E-08		
	4	-15,846	7,7897	22,1696	164,801	3,52729E-09		
	5	-15,996	14,403	16,8311	48,2075	0,000713362	0,7134	E-03
7	1	-15,224	6,5898	23,6225	230,279	4,31012E-12		
	2	-15,401	6,8658	23,2661	212,135	2,75139E-11		
	3	-15,654	7,2591	22,7824	189,774	2,71513E-10		
	4	-15,818	10,114	19,9012	97,7513	3,67455E-06		

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

	5	-16,036	21,301	13,432	22,0395	0,01341486	13,415	E-03
8	1	-15,22	6,7802	23,3752	217,53	1,58492E-11		
	2	-15,419	7,3639	22,6578	184,408	4,70736E-10		
	3	-15,572	6,9277	23,1882	208,363	4,04668E-11		
	4	-15,765	18,471	14,6703	29,3106	0,00580128	5,8013	E-03
	5	-16,026	19,905	14,0209	25,2402	0,009245215	9,2452	E-03

La tabla 4.21 es un resumen de los resultados de desempeño del sistema al variar la distancia desde 1 km hasta 5 Km, con incrementos de 1 km entre cada prueba para el caso de ocho ONT; es decir, corresponde a la evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF actuando con 8 portadoras de radio, y es congruente con los resultados del peor caso de referencia mostrados en la tabla 4.14. Sin embargo, para este caso si hay sacrificio de distancia porque la diafonía y los efectos no lineales de la fibra ya son apreciables. Por lo anterior, la optimización del sistema arrojó que la máxima distancia con el fin de mantener un desempeño aceptable y darle servicio a todas las 8 ONT simultáneamente, bajó de 5,887 km a 3,830 Km (con máximo EVM de 14,87 % y máxima BER de 10^{-3}), concluyendo que, al pasar de 4 a 8 canales, la penalidad relativa en distancia corresponde a 2,057 Km, y entonces, la penalidad acumulativa en distancia con respecto a un solo canal se mantiene en 2,057 Km.

Tabla 4.22 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON *Quad Play* para 16 ONT (Distancia variable).

ONT	D[Km]	PRxo [dBm]	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lin]	BER (con SNR [lin])	BER (aprox)
1	1	-15,213	6,99564	23,1035	204,3362	6,10985E-11	
	2	-15,39	7,32948	22,6985	186,146	3,9386E-10	
	3	-15,682	6,61534	23,589	228,5051	5,16566E-12	
	4	-15,771	7,15798	22,9042	195,173	1,56136E-10	
	5	-15,923	7,03825	23,0507	201,8693	7,86478E-11	
2	1	-15,215	6,5867	23,6266	230,4963	4,21541E-12	
	2	-15,409	6,49896	23,7431	236,7619	2,22399E-12	
	3	-15,641	6,44658	23,8134	240,6253	1,49956E-12	
	4	-15,834	8,31813	21,5995	144,5268	2,8501E-08	
	5	-16,011	7,36639	22,6549	184,2854	4,76678E-10	
3	1	-15,202	6,78911	23,3637	216,9574	1,6805E-11	
	2	-15,401	6,74465	23,4208	219,8269	1,25339E-11	
	3	-15,638	6,53252	23,6984	234,3355	2,84877E-12	
	4	-15,855	7,08582	22,9922	199,1683	1,03702E-10	
	5	-16,099	7,24075	22,8043	190,7363	2,46007E-10	

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

4	1	-15,213	7,14053	22,9254	196,1279	1,41586E-10		
	2	-15,383	6,69507	23,4849	223,0948	8,97607E-12		
	3	-15,508	7,44994	22,5569	180,1749	7,26775E-10		
	4	-15,743	7,44197	22,5662	180,5612	6,98525E-10		
	5	-16,009	7,37383	22,6461	183,9138	4,952E-10		
5	1	-15,21	7,09904	22,976	198,4271	1,11879E-10		
	2	-15,443	7,00591	23,0907	203,7375	6,49596E-11		
	3	-15,547	7,27873	22,7589	188,7507	3,0154E-10		
	4	-16	8,34464	21,5718	143,6099	3,13312E-08		
	5	-16,033	11,909	18,4825	70,51002	6,49347E-05		
6	1	-15,209	6,49088	23,7539	237,352	2,09404E-12		
	2	-15,45	7,53423	22,4592	176,1663	1,09683E-09		
	3	-15,581	7,75979	22,203	166,0735	3,09467E-09		
	4	-15,79	8,24345	21,6778	147,1572	2,17238E-08		
	5	-16,023	23,093	12,7304	18,75159	0,019799043	19,799	E-03
7	1	-15,242	6,64001	23,5566	226,8101	6,14174E-12		
	2	-15,401	6,96599	23,1403	206,0794	5,11165E-11		
	3	-15,672	7,38944	22,6278	183,1373	5,36263E-10		
	4	-15,839	12,9723	17,7397	59,42457	0,000212214	0,21221	E-03
	5	-16,054	22,5276	12,9457	19,70475	0,01767156	17,6716	E-03
8	1	-15,239	6,46297	23,7914	239,4065	1,69808E-12		
	2	-15,416	7,22263	22,8261	191,6943	2,23E-10		
	3	-15,663	8,03764	21,8974	154,79	9,8877E-09		
	4	-15,921	17,437	15,1706	32,88963	0,003871918	3,87192	E-03
	5	-16,067	24,317	12,2818	16,91136	0,024712926	24,7129	E-03
9	1	-15,212	7,1323	22,9354	196,5804	1,35172E-10		
	2	-15,487	9,22263	20,7029	117,5684	4,65106E-07		
	3	-15,618	9,99482	20,0045	100,1036	2,87278E-06		
	4	-15,805	23,2659	12,6656	18,47399	0,020468401	20,4684	E-03
	5	-16,001	16,478	15,6619	36,82927	0,002492776	2,49278	E-03
10	1	-15,215	6,51412	23,7229	235,6617	2,48819E-12		
	2	-15,435	7,68425	22,288	169,3546	2,20847E-09		
	3	-15,614	12,4811	18,0749	64,19387	0,000127316	0,12732	E-03
	4	-15,878	23,8704	12,4428	17,55011	0,022874488	22,8745	E-03
	5	-15,985	14,422	16,8195	48,07856	0,000723449	0,72345	E-03
11	1	-15,228	6,46642	23,7867	239,1512	1,74288E-12		
	2	-15,391	6,90367	23,2184	209,8166	3,48757E-11		

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

	3	-15,67	15,4822	16,2034	41,71924	0,001451234	1,45123	E-03
	4	-15,915	21,746	13,2524	21,14665	0,014899166	14,8992	E-03
	5	-15,970	21,8535	13,2096	20,9392	0,015268112	15,2681	E-03
12	1	-15,223	6,70827	23,4678	222,218	9,81713E-12		
	2	-15,45	7,67707	22,2961	169,6714	2,13771E-09		
	3	-15,627	21,0803	13,5225	22,50335	0,012705585	12,7056	E-03
	4	-15,801	17,6026	15,0885	32,27345	0,004149745	4,14975	E-03
	5	-16,05	33,4585	9,50987	8,932796	0,068004735	68,0047	E-03
13	1	-15,205	6,58591	23,6277	230,5521	4,19147E-12		
	2	-15,41	7,06367	23,0194	200,4194	9,12334E-11		
	3	-15,552	17,9237	14,9315	31,1277	0,004722017	4,72202	E-03
	4	-15,762	15,6139	16,1298	41,01831	0,001567722	1,56772	E-03
	5	-15,987	60,848	4,31508	2,700897	0,173384381	173,384	E-03
14	1	-15,208	6,60501	23,6025	229,2204	4,80185E-12		
	2	-15,362	7,2194	22,83	191,8659	2,19112E-10		
	3	-15,548	22,3943	12,9972	19,93994	0,017184657	17,1847	E-03
	4	-15,836	15,5791	16,1491	41,20155	0,001536379	1,53638	E-03
	5	-15,981	109,229	-0,76673	0,838161	0,255834315	255,834	E-03
15	1	-15,239	6,62176	23,5805	228,0624	5,40449E-12		
	2	-15,449	10,721	19,3953	87,00268	1,13528E-05		
	3	-15,65	24,0225	12,3876	17,32859	0,023494987	23,495	E-03
	4	-15,801	26,6018	11,5018	14,13115	0,034775917	34,7759	E-03
	5	-16,122	63,7518	3,91015	2,460453	0,181123576	181,124	E-03
16	1	-15,21	6,60737	23,5994	229,0566	4,88285E-12		
	2	-15,432	9,07011	20,8477	121,5556	3,07368E-07		
	3	-15,693	23,3645	12,6289	18,31836	0,020854098	20,8541	E-03
	4	-15,826	27,2194	11,3024	13,49715	0,037644067	37,6441	E-03
	5	-16,047	55,3338	5,14019	3,26602	0,157113556	157,114	E-03

La tabla 4.22 es un resumen de los resultados de desempeño del sistema al variar la distancia desde 1 km hasta 5 Km, con incrementos de 1 km entre cada prueba para el caso de 16 ONT; es decir, corresponde a la evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF actuando con 16 portadoras de radio, y es congruente con los resultados del peor caso de referencia mostrados en la tabla 4.15. Sin embargo, para este caso si hay sacrificio de distancia porque la diafonía y los efectos no lineales de la fibra ya son apreciables. Por lo anterior, la optimización del sistema arrojó que la máxima distancia con el fin de mantener un desempeño aceptable y darle servicio a todas las 16 ONT simultáneamente, bajó de 5,887 km a 2,358 Km (con máximo EVM de 14,87 % y máxima BER de 10^{-3}),

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

concluyendo que, al pasar de 8 a 16 canales, la penalidad relativa en distancia corresponde a 1,472 Km, y entonces, la penalidad acumulativa en distancia con respecto a 1 solo canal totaliza 3,529 Km.

Tabla 4.23 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON *Quad Play* para 32 ONT (Distancia variable).

ONT	D[Km]	PRxo [dBm]	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lin]	BER (con SNR [lin])	BER (aprox)	
1	1	-15,238	6,54513	23,6816	233,4339	3,12335E-12		
	2	-15,492	6,97377	23,1307	205,62	5,35769E-11		
	3	-15,73	7,08551	22,9926	199,1855	1,03519E-10		
2	1	-15,205	6,50636	23,7332	236,2237	2,34953E-12		
	2	-15,411	6,67633	23,5092	224,3493	7,8965E-12		
	3	-15,485	8,46971	21,4426	139,4001	4,84032E-08		
3	1	-15,213	6,345	23,9514	248,3919	6,79241E-13		
	2	-15,352	7,07143	23,0099	199,9797	9,54338E-11		
	3	-15,669	6,98094	23,1217	205,1973	5,59448E-11		
4	1	-15,249	7,1494	22,9146	195,6413	1,48821E-10		
	2	-15,3	7,06758	23,0146	200,1974	9,33307E-11		
	3	-15,613	6,83956	23,2994	213,7684	2,32818E-11		
5	1	-15,244	6,58334	23,6311	230,7321	4,11513E-12		
	2	-15,582	6,67347	23,513	224,5414	7,7431E-12		
	3	-15,589	7,08399	22,9944	199,2708	1,02619E-10		
6	1	-15,208	6,60508	23,6024	229,2154	4,80433E-12		
	2	-15,423	6,66375	23,5256	225,1969	7,24166E-12		
	3	-15,672	7,15349	22,9096	195,418	1,52265E-10		
7	1	-15,251	6,49571	23,7475	236,9994	2,17073E-12		
	2	-15,392	7,21795	22,8317	191,9428	2,17393E-10		
	3	-15,477	9,04188	20,8748	122,3157	2,84044E-07		
8	1	-15,217	6,43978	23,8226	241,1339	1,42375E-12		
	2	-15,529	7,34577	22,6793	185,3214	4,28619E-10		
	3	-15,535	7,40109	22,6141	182,5612	5,68917E-10		
9	1	-15,197	6,89762	23,226	210,1848	3,35868E-11		
	2	-15,435	7,25767	22,7841	189,8476	2,69468E-10		
	3	-15,607	8,64446	21,2652	133,8209	8,61967E-08		
10	1	-15,21	6,71385	23,4606	221,8487	1,01946E-11		
	2	-15,333	7,19912	22,8544	192,9483	1,96107E-10		
	3	-15,689	15,4111	16,2433	42,10513	0,0013909	1,3909	E-03

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

11	1	-15,186	7,07031	23,0112	200,043	9,48173E-11		
	2	-15,385	7,42017	22,5917	181,6237	6,26366E-10		
	3	-15,67	22,1105	13,108	20,45525	0,016166566	16,1666	E-03
12	1	-15,196	6,64194	23,5541	226,6785	6,22482E-12		
	2	-15,345	7,39412	22,6223	182,9057	5,49159E-10		
	3	-15,655	29,9072	10,4845	11,18019	0,05055979	50,5598	E-03
13	1	-15,222	6,79989	23,35	216,27	1,80283E-11		
	2	-15,365	7,02651	23,0652	202,5445	7,33961E-11		
	3	-15,572	20,5001	13,7649	23,7952	0,010929303	10,9293	E-03
14	1	-15,226	6,68142	23,5026	224,0074	8,17719E-12		
	2	-15,445	7,21758	22,8322	191,9627	2,1695E-10		
	3	-15,629	22,7594	12,8568	19,30536	0,018532019	18,532	E-03
15	1	-15,212	6,41031	23,8624	243,3562	1,13503E-12		
	2	-15,495	7,7466	22,2178	166,6393	2,91972E-09		
	3	-15,661	20,2488	13,872	24,38949	0,010201024	10,201	E-03
16	1	-15,205	6,85622	23,2783	212,7307	2,58878E-11		
	2	-15,416	7,98676	21,9526	156,7686	8,06421E-09		
	3	-15,471	21,998	13,1523	20,66484	0,015770826	15,7708	E-03
17	1	-15,223	7,58989	22,3953	173,5919	1,42881E-09		
	2	-15,442	9,93039	20,0607	101,4069	2,50681E-06		
	3	-15,663	22,1462	13,094	20,38919	0,016293455	16,2935	E-03
18	1	-15,219	6,90935	23,2113	209,4719	3,61272E-11		
	2	-15,404	9,8044	20,1716	104,03	1,90589E-06		
	3	-15,773	18,5264	14,6442	29,13513	0,005918167	5,91817	E-03
19	1	-15,224	7,44729	22,56	180,3033	7,17264E-10		
	2	-15,382	15,7552	16,0515	40,28576	0,001699663	1,69966	E-03
	3	-15,587	15,2169	16,3535	43,18641	0,001235072	1,23507	E-03
20	1	-15,185	6,91392	23,2055	209,1951	3,71646E-11		
	2	-15,483	16,4912	15,6549	36,77002	0,002509258	2,50926	E-03
	3	-15,538	16,3774	15,7151	37,28275	0,002370225	2,37023	E-03
21	1	-15,217	7,30024	22,7333	187,6404	3,37899E-10		
	2	-15,378	17,5072	15,1357	32,62621	0,003988278	3,98828	E-03
	3	-15,622	15,5338	16,1745	41,44242	0,001496148	1,49615	E-03
22	1	-15,255	6,90085	23,2219	209,988	3,42696E-11		
	2	-15,354	23,7217	12,4971	17,77081	0,022273603	22,2736	E-03
	3	-15,697	17,2721	15,2531	33,52056	0,003607157	3,60716	E-03

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

23	1	-15,178	7,23429	22,8121	191,077	2,37564E-10		
	2	-15,377	22,6222	12,9093	19,54028	0,01802069	18,0207	E-03
	3	-15,565	21,387	13,397	21,86258	0,01369613	13,6961	E-03
24	1	-15,186	7,10821	22,9648	197,9153	1,17899E-10		
	2	-15,251	15,7169	16,0727	40,48235	0,001663184	1,66318	E-03
	3	-15,617	24,8889	12,0799	16,14317	0,027135369	27,1354	E-03
25	1	-15,211	7,14523	22,9197	195,8698	1,45378E-10		
	2	-15,435	21,5381	13,3359	21,55689	0,014196863	14,1969	E-03
	3	-15,608	29,7441	10,532	11,3031	0,049762816	49,7628	E-03
26	1	-15,219	7,33502	22,692	185,8652	4,05369E-10		
	2	-15,497	26,5333	11,5242	14,20421	0,03446101	34,461	E-03
	3	-15,723	35,8635	8,90694	7,77488	0,079650882	79,6509	E-03
27	1	-15,197	7,36825	22,6527	184,1921	4,81262E-10		
	2	-15,396	22,5942	12,9201	19,58881	0,017916923	17,9169	E-03
	3	-15,572	40,3908	7,87435	6,129636	0,100575217	100,575	E-03
28	1	-15,266	7,26239	22,7784	189,6013	2,76361E-10		
	2	-15,495	22,623	12,909	19,53895	0,018023543	18,0235	E-03
	3	-15,661	45,476	6,84435	4,83543	0,122027999	122,028	E-03
29	1	-15,207	6,92158	23,1959	208,7322	3,89668E-11		
	2	-15,413	19,732	14,0966	25,68361	0,008784317	8,78432	E-03
	3	-15,659	57,2545	4,84381	3,050571	0,163029293	163,029	E-03
30	1	-15,208	7,1525	22,9108	195,472	1,51426E-10		
	2	-15,446	22,5995	12,918	19,5795	0,017936777	17,9368	E-03
	3	-15,564	87,9693	1,11338	1,292224	0,229196493	229,196	E-03
31	1	-15,244	6,99051	23,1098	204,6359	5,92529E-11		
	2	-15,467	19,8758	14,0335	25,31349	0,009167304	9,1673	E-03
	3	-15,738	65,1229	3,72533	2,35794	0,18459656	184,597	E-03
32	1	-15,21	7,17523	22,8833	194,2355	1,71875E-10		
	2	-15,382	20,0831	13,9434	24,79349	0,009734907	9,73491	E-03
	3	-15,389	74,7144	2,53191	1,791394	0,206048884	206,049	E-03

La tabla 4.23 es un resumen de los resultados de desempeño del sistema al variar la distancia desde 1 km hasta 3 Km, con incrementos de 1 km entre cada prueba para el caso de 32 ONT; es decir, corresponde a la evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF actuando con 32 portadoras de radio, y es congruente con los resultados del peor caso de referencia mostrados en la tabla 4.16. Sin embargo, para este caso si hay sacrificio de distancia porque la diafonía y los efectos no lineales de la fibra ya son apreciables. Por lo anterior, la optimización del sistema

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

arrojó que la máxima distancia con el fin de mantener un desempeño aceptable y darle servicio a todas las 32 ONT simultáneamente, bajó de 5,887 km a 1,5185 Km (con máximo EVM de 14,87 % y máxima BER de 10^{-3}), concluyendo que, al pasar de 16 a 32 canales, la penalidad relativa en distancia corresponde a 0,8395 Km, y entonces, la penalidad acumulativa en distancia con respecto a 1 solo canal totaliza 4,3685 Km.

Tabla 4.24 Resultados de OPM en la red FTTH-GPON *Quad Play* para 64 ONT (Distancia variable).

ONT	D[Km]	PRxo [dBm]	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lin]	BER (con SNR [lin])	BER (aprox)
1	1	-15,22	6,4713	23,7802	238,7929	1,80777E-12	
	2	-15,324	7,233	22,8136	191,1447	2,35922E-10	
2	1	-15,195	7,0749	23,0056	199,7835	9,73707E-11	
	2	-15,202	8,2176	21,7051	148,0836	1,97433E-08	
3	1	-15,223	6,9884	23,1125	204,7622	5,84924E-11	
	2	-15,288	6,9648	23,1418	206,148	5,07587E-11	
4	1	-15,243	6,7465	23,4184	219,7048	1,26912E-11	
	2	-15,163	7,4769	22,5255	178,8767	8,30372E-10	
5	1	-15,188	6,5067	23,7327	236,1964	2,35606E-12	
	2	-15,619	6,8177	23,3273	215,143	2,02296E-11	
6	1	-15,233	6,6336	23,565	227,249	5,87256E-12	
	2	-15,547	6,7003	23,4781	222,7475	9,30021E-12	
7	1	-15,252	6,4432	23,8179	240,8766	1,46161E-12	
	2	-15,436	7,3005	22,7329	187,6245	3,38452E-10	
8	1	-15,271	6,6989	23,4799	222,8401	9,21267E-12	
	2	-15,451	8,4575	21,4552	139,8033	4,64276E-08	
9	1	-15,261	6,5636	23,6572	232,1251	3,5697E-12	
	2	-15,667	9,1425	20,7787	119,6384	3,75089E-07	
10	1	-15,257	6,7576	23,4041	218,9834	1,36621E-11	
	2	-15,449	7,9818	21,958	156,9622	7,90498E-09	
11	1	-15,175	6,3902	23,8897	244,8877	9,70911E-13	
	2	-15,437	8,5722	21,3382	136,0868	6,81822E-08	
12	1	-15,178	6,6745	23,5117	224,4753	7,79558E-12	
	2	-15,444	8,3043	21,614	145,009	2,71165E-08	
13	1	-15,26	6,4324	23,8325	241,6879	1,34554E-12	
	2	-15,284	7,4023	22,6127	182,5037	5,72284E-10	
14	1	-15,275	6,6075	23,5992	229,0449	4,88866E-12	
	2	-15,422	7,5877	22,3978	173,6921	1,41418E-09	

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

15	1	-15,179	6,9639	23,143	206,2044	5,04668E-11		
	2	-15,415	7,5803	22,4062	174,0297	1,36598E-09		
16	1	-15,234	7,0381	23,0509	201,8784	7,85753E-11		
	2	-15,525	7,7203	22,2473	167,7765	2,59748E-09		
17	1	-15,195	6,3993	23,8773	244,1917	1,04232E-12		
	2	-15,475	8,2771	21,6424	145,9634	2,45724E-08		
18	1	-15,287	7,3918	22,625	183,0214	5,42677E-10		
	2	-15,392	13,919	17,128	51,61766	0,000492543	0,4925	E-03
19	1	-15,175	7,2226	22,8261	191,6958	2,22965E-10		
	2	-15,456	10,205	19,8239	96,02629	4,40211E-06		
20	1	-15,212	6,4825	23,7652	237,9695	1,96617E-12		
	2	-15,436	10,9	19,2511	84,16043	1,53139E-05		
21	1	-15,244	7,116	22,9552	197,48	1,23275E-10		
	2	-15,531	12,884	17,7987	60,23768	0,000194478	0,1945	E-03
22	1	-15,153	7,2535	22,789	190,0653	2,63524E-10		
	2	-15,324	9,6597	20,3007	107,1698	1,37335E-06		
23	1	-15,178	7,0196	23,0737	202,9408	7,04784E-11		
	2	-15,726	25,073	12,0158	15,90663	0,027931615	27,932	E-03
24	1	-15,196	7,3818	22,6367	183,5161	5,15818E-10		
	2	-15,701	27,94	11,0755	12,80996	0,041047712	41,048	E-03
25	1	-15,175	6,9388	23,1744	207,7	4,33063E-11		
	2	-15,215	20,287	13,8556	24,29722	0,010310695	10,311	E-03
26	1	-15,173	6,861	23,2723	212,4365	2,66784E-11		
	2	-15,332	21,326	13,4219	21,98841	0,013495431	13,495	E-03
27	1	-15,828	9,5634	20,3878	109,3391	1,09535E-06		
	2	-22,192	35,389	9,0226	7,984734	0,077376158	77,376	E-03
28	1	-15,211	7,7133	22,2552	168,0798	2,51774E-09		
	2	-15,334	23,683	12,5113	17,82912	0,022117677	22,118	E-03
29	1	-15,332	8,5531	21,3575	136,6949	6,40253E-08		
	2	-15,744	25,753	11,7834	15,07785	0,030925689	30,926	E-03
30	1	-15,252	7,1532	22,91	195,4344	1,5201E-10		
	2	-15,386	23,757	12,484	17,71753	0,022417106	22,417	E-03
31	1	-15,237	7,2586	22,7829	189,799	2,70814E-10		
	2	-15,678	25,471	11,8789	15,41322	0,029674425	29,674	E-03
32	1	-23,782	36,868	8,66709	7,357137	0,08442023	84,42	E-03
	2	-28,884	41,441	7,65141	5,822917	0,105193879	105,19	E-03

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

33	1	-15,236	7,0325	23,0579	202,2025	7,60107E-11		
	2	-15,322	23,635	12,5289	17,90137	0,021926071	21,926	E-03
34	1	-15,236	7,1567	22,9057	195,2402	1,55065E-10		
	2	-15,322	21,928	13,1802	20,79788	0,015524919	15,525	E-03
35	1	-15,22	7,3671	22,654	184,2481	4,78502E-10		
	2	-15,489	23,075	12,7373	18,78158	0,019728149	19,728	E-03
36	1	-15,294	7,6985	22,2719	168,7293	2,35509E-09		
	2	-15,508	19,688	14,1159	25,7983	0,008669035	8,669	E-03
37	1	-15,233	7,5992	22,3847	173,1684	1,49235E-09		
	2	-15,349	21,405	13,3897	21,82587	0,013755276	13,755	E-03
38	1	-15,149	7,2418	22,8031	190,6821	2,47377E-10		
	2	-15,076	18,949	14,4484	27,8512	0,006850596	6,8506	E-03
39	1	-15,126	6,9736	23,1309	205,6302	5,35207E-11		
	2	-15,149	17,856	14,9644	31,36489	0,004597234	4,5972	E-03
40	1	-15,243	7,5947	22,3898	173,3721	1,46144E-09		
	2	-15,343	19,386	14,2504	26,60979	0,007896873	7,8969	E-03
41	1	-15,243	7,9294	22,0152	159,0442	6,37938E-09		
	2	-15,351	18,844	14,4966	28,16167	0,006612052	6,6121	E-03
42	1	-15,248	7,4997	22,4991	177,7897	9,28407E-10		
	2	-15,324	18,274	14,7632	29,94437	0,005398646	5,3986	E-03
43	1	-15,296	6,8309	23,3104	214,3096	2,20287E-11		
	2	-15,792	19,699	14,1111	25,76944	0,008697891	8,6979	E-03
44	1	-15,294	7,7154	22,2528	167,9886	2,54145E-09		
	2	-15,449	18,139	14,8275	30,39168	0,005131863	5,1319	E-03
45	1	-15,26	7,0829	22,9958	199,3325	1,01973E-10		
	2	-15,388	15,362	16,271	42,37377	0,001350409	1,3504	E-03
46	1	-15,196	7,5114	22,4856	177,2377	9,82548E-10		
	2	-15,494	23,633	12,5298	17,90522	0,021915915	21,916	E-03
47	1	-15,11	7,0193	23,0742	202,963	7,03184E-11		
	2	15,427	18,914	14,4642	27,95245	0,00677184	6,7718	E-03
48	1	-15,234	6,7226	23,4493	221,273	1,08122E-11		
	2	-15,525	17,977	14,9058	30,94441	0,004820826		
49	1	-15,224	7,0518	23,0339	201,0917	8,51644E-11		
	2	-15,521	18,244	14,7778	30,04579	0,005336929	5,3369	E-03
50	1	-15,3	7,5273	22,4672	176,4902	1,06094E-09		
	2	-15,267	19,995	13,9816	25,01285	0,009491136	9,4911	E-03

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

51	1	-15,196	7,2515	22,7915	190,1718	2,60662E-10		
	2	-15,403	20,846	13,6197	23,01258	0,011971898	11,972	E-03
52	1	-15,166	7,1109	22,9615	197,7656	1,19721E-10		
	2	-15,349	20,958	13,5731	22,76741	0,012319455	12,319	E-03
53	1	-15,181	7,0155	23,0788	203,1814	6,87641E-11		
	2	-15,126	18,164	14,8157	30,30864	0,00518034	5,1803	E-03
54	1	-15,21	6,9811	23,1216	205,1911	5,59805E-11		
	2	-15,674	23,091	12,7311	18,7546	0,019791926	19,792	E-03
55	1	-15,176	6,9745	23,1297	205,5747	5,38254E-11		
	2	-15,421	21,503	13,3499	21,62656	0,014081082	14,081	E-03
56	1	-15,24	7,093	22,9835	198,7678	1,08043E-10		
	2	-15,539	23,256	12,6694	18,4902	0,020428667	20,429	E-03
57	1	-15,261	7,2373	22,8084	190,9167	2,41499E-10		
	2	-15,503	21,614	13,3051	21,40498	0,014452783	14,453	E-03
58	1	-15,212	6,8395	23,2995	213,7693	2,32797E-11		
	2	-15,611	23,865	12,4449	17,55878	0,022850576	22,851	E-03
59	1	-15,712	7,8395	22,1142	162,7114	4,37352E-09		
	2	-15,911	22,865	12,8168	19,12826	0,018927642	18,928	E-03
60	1	-15,237	6,8217	23,3222	214,8921	2,07552E-11		
	2	-15,296	21,404	13,39	21,82748	0,013752675	13,753	E-03
61	1	-15,258	7,4803	22,5216	178,7132	8,44425E-10		
	2	-15,568	28,224	10,9875	12,55318	0,042405125	42,405	E-03
62	1	-15,22	7,5131	22,4837	177,16	9,90418E-10		
	2	-15,384	21,927	13,1803	20,79852	0,015523737	15,524	E-03
63	1	-15,226	7,4199	22,592	181,6366	6,25536E-10		
	2	-15,389	18,786	14,5233	28,3355	0,006482253	6,4823	E-03
64	1	-15,279	6,9491	23,1614	207,0828	4,61289E-11		
	2	-15,585	20,49	13,7693	23,81922	0,010898839	10,899	E-03

La tabla 4.24 es un resumen de los resultados de desempeño del sistema al variar la distancia desde 1 km hasta 3 Km, con incrementos de 1 km entre cada prueba para el caso de 64 ONT; es decir, corresponde a la evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF actuando con 64 portadoras de radio, y es congruente con los resultados del peor caso de referencia mostrados en la tabla 4.17. Sin embargo, para este caso si hay sacrificio de distancia porque la diafonía y los efectos no lineales de la fibra ya son apreciables. Por lo anterior, la optimización del sistema arrojó que la máxima distancia con el fin de mantener un desempeño aceptable y darle servicio a todas las 64 ONT simultáneamente, bajó de 5.887 km a 1.30925 Km (con máximo EVM de 14,87% y máxima BER de 10^{-3}),

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

concluyendo que, al pasar de 32 a 64 canales, la penalidad relativa en distancia corresponde a 0.20925 Km, y entonces, la penalidad acumulativa en distancia con respecto a un solo canal totaliza 4,57775 Km.

Otra forma de evaluar el desempeño del sistema cuando se emplean desde 8 canales hasta 64 canales, es precisar que si se aumenta la distancia por encima de la máxima alcanzada en cada caso particular (8 ONT, 16 ONT, 32 ONT y 64 ONT), el desempeño del sistema empeorará ($EVM > 14,87\%$ y $BER > 10^{-3}$) y no se podrá garantizar QoS.

La tabla 4.25 muestra un resumen importante sobre la comparación del desempeño de los servicios de la red FTTH-GPON *Quad Play* para varias ONT especificando el alcance máximo para un desempeño mínimo aceptable en el servicio de radio, pues los servicios *Triple Play* están totalmente garantizados con las distancias de acceso empleadas.

Tabla 4.25. Comparación del desempeño de los servicios de la red FTTH-GPON *Quad Play* para varias ONT especificando el alcance máximo.

<i>Servicio</i>	<i>No. ONT</i>	<i>BER</i>	<i>Distancia</i>
Voz/datos	2	1×10^{-40}	5,88870 Km
Video		$3,69857 \times 10^{-7}$	5,88870 Km
Radio		$3,47713 \times 10^{-10}$	5,88870 Km
Voz/datos	4	1×10^{-40}	5,88870 Km
Video		$3,69857 \times 10^{-7}$	5,88870 Km
Radio		$3,98063 \times 10^{-8}$	5,88870 Km
Voz/datos	8	1×10^{-40}	5,88870 Km
Video		$3,69857 \times 10^{-7}$	5,88870 Km
Radio		1×10^{-3}	3,83000 Km
Voz/datos	16	1×10^{-40}	5,88870 Km
Video		$3,69857 \times 10^{-7}$	5,88870 Km
Radio		1×10^{-3}	2,35800 Km

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

Voz/datos	32	1×10^{-40}	5,88870 Km
Video		$3,69857 \times 10^{-7}$	5,88870 Km
Radio		1×10^{-3}	1,51850 Km
Voz/datos	64	1×10^{-40}	5,88870 Km
Video		$3,69857 \times 10^{-7}$	5,88870 Km
Radio		1×10^{-3}	1,30925 Km

Se deduce claramente de la tabla 4.25 que a medida que se incrementa el número de ONT (y por ende de portadoras de radio) el desempeño del cuarto servicio (radio-telefonía celular) empeora desde el orden de una BER de 10^{-10} hasta llegar al mínimo aceptable que es una BER máxima de 10^{-3} ; no obstante, el desempeño de los servicios *Triple Play* en la red FTTH-FPON permanece invariable puesto que el alcance máximo es de 5,887 Km, siendo mucho menor que 20 Km que es la distancia después de la cual el desempeño empieza a verse comprometido según [44] [47].

Finalmente, después de haber evaluado el desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF, en el capítulo 5 se procede a puntualizar las conclusiones, recomendaciones y perspectivas o trabajos futuros.

5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS (TRABAJO FUTURO).

En este trabajo de grado se alcanzaron los objetivos propuestos permitiendo alcanzar un conocimiento más amplio sobre el desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF. Tras un proceso investigativo, se definieron criterios para la evaluación del desempeño de la red FTTH-GPON, y se analizaron y evaluaron diferentes escenarios de simulación para determinar la incidencia de agregar un cuarto servicio (RoF) a una red *Triple Play* existente.

Mediante la investigación sobre cómo incide un módulo RoF agregándose a la red FTTH-GPON y la verificación a través de la simulación de dicha red, se realizó la validación de la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal en el desempeño de este tipo de redes *Quad Play*.

Además de las conclusiones detalladas en el capítulo 4, a continuación, se enuncian las conclusiones generales respecto al trabajo en sí, a la evaluación del desempeño del sistema FTTH-GPON y a la simulación, continuando con las recomendaciones y las perspectivas (trabajos futuros).

5.1. RESPECTO AL TRABAJO.

Este trabajo de grado definió lo importante que es llevar un monitoreo óptico adecuado para garantizar el óptimo funcionamiento de una red FTTH-GPON *Quad Play*. Además, se adquirieron habilidades y destrezas en cuanto al proceso de trabajo en equipo y cumplimiento de las fases del trabajo. De acuerdo a lo mencionado en los agradecimientos del presente trabajo de grado, también permitió interactuar con personas que tienen dominio sobre diferentes áreas de las telecomunicaciones, logrando consolidar los fundamentos del trabajo y afianzando el proceso de formación en el área de investigación.

Se aprendió día a día de los errores, a ser perseverante, a saber que “*esfuerzo no es lo mismo que resultados*”, a ser buenos investigadores (curiosidad por resolver cada duda), y a seleccionar y descartar lo que no es pertinente con el propósito de llegar al punto indicado.

A través de la realización de este trabajo de grado se obtuvieron valiosos aportes en el entorno social, académico e investigativo (área de metodología, modelamiento y simulación con herramientas de sistemas ópticos).

Este trabajo de grado se constituye en una guía factible de ser adoptada por los operadores de este tipo de redes, teniendo en cuenta que el OPM avanzado o el monitoreo de la calidad de la señal, que mide la SNR por canal, ha sido adoptado en los laboratorios como una técnica de monitoreo de nueva generación. Este trabajo de grado es de gran utilidad para los proveedores y operadores de red, debido a las ventajas que ofrece la

realización de un adecuado monitoreo del canal óptico con el fin de obtener un mejor desempeño de las redes de acceso FTTH-GPON, y de esta manera lograr una mejor percepción de calidad de servicio de los usuarios.

Este trabajo de grado permite generar nuevos procesos de investigación y desarrollo en el área de la convergencia entre las comunicaciones inalámbricas y las comunicaciones ópticas, campo en el cual, el país aún se encuentra rezagado.

Con este trabajo de grado se logró obtener un amplio conocimiento de la tecnología RoF y del monitoreo del canal óptico con alta proyección en las comunicaciones ópticas, y los resultados obtenidos son de gran importancia en el campo investigativo de la línea de comunicaciones ópticas del GNTT; a su vez, este estudio es útil para posteriores proyectos que deseen aplicar estas temáticas en nuevas soluciones dentro del campo radio/óptico, y sirve de referencia para temas tratados en cursos y asignaturas del programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones que traten con temáticas relacionadas.

Trabajar dentro de las ondas milimétricas no es una tarea fácil pues demanda bastante investigación y lectura para poder configurar y obtener un buen desempeño de la red, ya que se pueden llegar a resultados erróneos simplemente por haber configurado inapropiadamente algún parámetro o realizar una mala interpretación de algún resultado.

Durante el desarrollo del presente trabajo de grado, se evidenció como uno de los resultados más importantes la integración del cuarto servicio (módulo RoF: servicio de radio- telefonía celular) a la red FTTH-GPON *Triple Play* existente, el cual impactó de manera positiva a cada uno de los servicios porque se mejoró en cierta medida cada uno de los parámetros de desempeño de la red (EVM, SNR, BER, factor Q, jitter) permitiendo de esta manera alcanzar unos metros adicionales valiosos dentro de la red de acceso lo que permite a los operadores tener ventajas frente a la flexibilidad en la ubicación de los elementos de red.

Finalmente, mediante la utilización de la herramienta software OptSim, se analizó y se evaluó la eficiencia y efectividad de la solución al problema planteado (evaluación del desempeño de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF) a través de la simulación de un sistema Radio sobre una red *Triple Play* FTTH-GPON.

5.2. RESPECTO A LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN.

En el caso del modo muestra, se pudo observar que la longitud de onda a utilizar presenta una gran incidencia en los parámetros de simulación que este modo utiliza para llevar a cabo dicho proceso, por lo que entre más alejadas se encuentren las longitudes de onda a utilizar (por ejemplo la de 1490 nm utilizada para la transmisión de Internet/VoIP y la de 1550 nm utilizada para CATV digital, pertenecientes a dos bandas de transmisión diferentes, aunque se aprovechó todo el espectro óptico de DWDM mediante un plan de frecuencias y poder contar con las 64 portadoras de radio), la herramienta requiere más muestras por bit, configurando por defecto un número elevado (12512). Esto exige la utilización de un tiempo de simulación más elevado que debe ser establecido por el usuario, ya que al necesitar más muestras por bit, más tiempo necesita el simulador para su

procesamiento y el correcto despliegue de gráficos que muestren resultados confiables, requiriendo un equipo computacional con mejores capacidades.

El modo muestra resultó ser más “flexible” en cuanto a la implementación de las redes y en la unión de los módulos necesarios para la implementación, puesto que la configuración principal que engloba a todos los parámetros de los elementos de la red radica en una correcta configuración de los parámetros de simulación.

Optsim® es una poderosa herramienta que permite desplegar una gran cantidad de resultados numéricos y gráficos; sin embargo, para ciertas aplicaciones la herramienta ofrece otras maneras de obtener resultados cuantitativos a partir de diagramas, como el caso del diagrama de constelación. En este trabajo de grado se logró aprovechar todo lo que la herramienta otorga para el estudio realizado, de tal manera que el grupo de trabajo no se conformó solo con los datos que la herramienta muestra directamente, sino que se fue más allá de ellos y se aplicó otros conocimientos adquiridos en el proceso de investigación del estado del arte, contando todo el tiempo con el Ingeniero de soporte de OptSim (Jigesh Patel) y manteniendo permanente comunicación vía email para lograr el 100% de los objetivos propuestos.

5.3. RESPECTO A LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA Y A LA SIMULACIÓN.

Los resultados obtenidos de la investigación teórica se puntualizan a continuación:

- Las causas principales de la distorsión en la forma de onda óptica son: efecto chirp, dispersión de la fibra, pérdidas de la fibra (atenuación), y efectos no lineales.
- Es muy importante precisar que a velocidades de 10 Gbps, el mejoramiento en el desempeño de la transmisión usando la fibra *CorningLEAF* en relación con la fibra SMF-28 es mejor que a velocidades de 2.5 Gbps en cuanto al alcance máximo.
- Cuando se utilizan láser modulados externamente (EA-DFB y MZ) a 10 Gbps para un solo canal, también se encuentra una mejora en el desempeño (en términos de máximo alcance sin compensación de dispersión ni uso de amplificación) del sistema utilizando una fibra con dispersión negativa (*CorningLEAF*) que una con dispersión positiva (SMF-28). Además, aumentar el espaciamiento entre los canales significa solamente un mejoramiento pequeño en cuanto al máximo alcance logrado. Es importante decir que la fibra *CorningLEAF* se comporta mejor que la SMF-28 en las bandas C y L.
- Para una BER dada, el receptor tiene una mejor sensibilidad (más pequeña) usando una fibra *CorningLEAF* que una SMF-28; y consecuentemente para una sensibilidad de receptor dada, se obtiene un peor desempeño (BER más grande) usando una fibra SMF-28 que una *CorningLEAF*. Además, se debe tener en cuenta que al aumentar la velocidad de transmisión de datos, la sensibilidad del receptor empeora.

El análisis de los resultados de la simulación para un solo canal se presenta a continuación:

- La dispersión cromática es proporcional al cuadrado de la velocidad de transmisión de datos, y por lo tanto los pulsos se ven más afectados por la ISI degradando el desempeño del sistema.

- Los efectos de la atenuación y de la dispersión cromática se ven reflejados en función de la longitud de onda, por eso los valores obtenidos van cambiando de acuerdo a cómo cambien las degradaciones ópticas.

El resumen del análisis de los resultados de la simulación para varias ONT permite afirmar que el desempeño de la red en cuanto a la incidencia de la dispersión cromática y atenuación no se modifica en gran medida con respecto al uso de una sola ONT, puesto que dichas degradaciones dependen principalmente de la distancia y de la velocidad de transmisión respectivamente.

Por otro lado, la respuesta de los parámetros cuando se inyecta tráfico en el canal permite concluir que de ellos depende directamente la calidad de la señal, puesto que para una determinada longitud de onda la dispersión de la fibra tiene un comportamiento diferente, viéndose afectada la señal transmitida de forma distinta, y como se pudo observar el aumento de potencia no garantiza un mejoramiento en la señal; por el contrario, se puede ver más comprometida atenuando su valor en el trayecto de transmisión debido a los efectos no lineales. La velocidad de igual forma juega un papel importante dentro de la transmisión ya que al aumentarla se debe tener más cuidado al momento de transmitir los datos porque se hacen más vulnerables a los errores (por ejemplo se presenta ISI), y cuando sucede un error, el número de bits comprometido es mayor que para una menor velocidad de transmisión de datos, haciendo que su corrección y recuperación sea más compleja.

Entre las consideraciones que se deben tener en cuenta para el monitoreo adecuado del canal óptico están:

1. Se debe hacer un estudio de la cantidad de tráfico que va a existir en la red (promedio), las distancias entre nodos (longitud de la fibra), con el fin de seleccionar el tipo de fibra, porque según los resultados obtenidos de la simulación, las fibras tienen un comportamiento diferente dependiendo de las distancias. La fibra de tipo *CorningLEAF* tiene un mejor comportamiento en las condiciones donde las distancias a cubrir son mayores; lo anterior gracias al manejo de la dispersión que ese tipo de fibra hace al aprovechar la dispersión negativa.
2. Es muy importante observar que todas las conexiones y empalmes estén bien realizados, porque se constituyen en factores de gran incidencia en las pérdidas de la señal.
3. Es de vital importancia observar el comportamiento de los parámetros de la señal, en su transcurso hacia el equipo de recepción como por ejemplo la potencia (en este caso de estudio), ver cuánto se atenúa la señal y ver cuáles son las causas más importantes de estas pérdidas, para resolver este problema.

Por último, para llevar a cabo un buen monitoreo de la calidad de la señal, se recomienda usar el EVM, la SNR y la BER como parámetros de medición. El comportamiento del EVM se puede extraer del diagrama de constelación y la BER (factor Q) se puede obtener por medio del diagrama del ojo, el cual permite observar el estado de la señal en un momento dado, con el fin de analizar la incidencia de degradaciones ópticas como la atenuación, la dispersión cromática y el jitter.

En concordancia con los resultados a lo largo de las pruebas de simulación, al realizar el monitoreo del OCh cuando se varia la distancia de transmisión, se determinó el desempeño de la red a través de los resultados del

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

EVM y de la BER. A manera de conclusiones generales con respecto a los escenarios de simulación multicanal DWDM, se puede decir que:

- Todas las conclusiones obtenidas en los escenarios monocanal (una sola ONT) son aplicables a los escenarios multicanal (varias ONT), ya que se están trabajando los parámetros OPM y el caso monocanal es una referencia para el caso multicanal. Además, los resultados del trabajo muestran que inclusive se cumple con un buen desempeño usando la fibra estándar SMF-28, alcanzando una distancia de 1,250 Km (contexto de las redes de acceso) con una portadora óptica que transporta la señal RF, teniendo en cuenta que los operadores cuentan ya con este tipo de fibra instalada en todo el mundo, y no sería necesario cambiar la fibra por la sugerida *CorningLEAF* a pesar lograr un alcance de 5,877 Km, pues su costo es más elevado.
- Cuando se multiplexa, el desempeño de la red es ampliamente modificado al incidir las no linealidades en comparación con el canal simple. Este caso se trabajó con espaciamiento entre canales muy cercano (0.8 nm) y con combinadores (multiplexores) y divisores o splitters (demultiplexores) reales parametrizados de tal forma que la diafonía no fuese nula.
- Como el caso no es de condiciones ideales sino reales, entonces el proceso de multiplexación afecta directamente a la diafonía (incrementándola y por ende degradando el desempeño de sistema en la medida que el número de canales aumente y/o el espaciamiento entre ellos se reduzca); así, es posible afirmar que dicho proceso de combinación y separación de señales no afecta directamente a la dispersión cromática (que depende de la velocidad de transmisión, tipo de fibra, de la longitud de onda y distancia de transmisión junto con la constante de dispersión) ni a la atenuación (que depende del tipo de fibra, de la longitud de onda, y de la distancia de transmisión junto con la constante de atenuación).
- Es importante considerar que cuando se obtuvo las distancias de referencia para el canal simple, y por optimización, se consiguieron las distancias máximas para cada número de canales de radio simultáneos. Lo que se hizo fue un barrido entre 1 km hasta llegar a dichas distancias de referencia, espaciadas cada km; luego, al comparar cada distancia obtenida de cada canal particular (D_{ch_j}), se tiene lo siguiente:

Si,

$D < D_{ch_j} \Rightarrow BER_j < 10^{-3}$ (Desempeño bueno).

$D = D_{ch_j} \Rightarrow BER_j = 10^{-3}$ (Desempeño mínimo aceptable).

$D > D_{ch_j} \Rightarrow BER_j > 10^{-3}$ (Desempeño pobre).

Es necesario definir criterios, basados en el Monitoreo de Desempeño Óptico (OPM), con el fin realizar el monitoreo adecuado de los cuatro servicios y analizar la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red FTTH-GPON *Quad Play*. A continuación, se definen de manera general dichos criterios, los cuales están basados en OPM y corresponden a las consideraciones técnicas y tecnológicas para el monitoreo adecuado. Los criterios teóricos se dividen en dos categorías: conceptos

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

teóricos sobre OPM y las recomendaciones de la ITU-Serie G (Sistemas y Medios de Transmisión, Sistemas y Redes Digitales).

Estos criterios se encuentran implícitos en el capítulo 2 del presente trabajo de grado y en los resultados obtenidos a través de investigación y desarrollos anteriores. Por otra parte, las consideraciones se obtienen a través del análisis de resultados de la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red FTTH-GPON *Quad Play*, a través de los escenarios de simulación realizados en OptSim. Además, sirven de referencia (en ningún momento pretenden ser absolutos) y son aplicables a una red de acceso FTTH-GPON *Quad Play* que cumpla con las condiciones que se establecieron en la simulación.

Para lo anterior, es importante recordar que:

- El trabajo de grado sigue los lineamientos de trabajos publicados en institutos reconocidos como el IEEE, en donde primero se debe tener como referencia los resultados de una simulación, que desde luego son confiables por utilizar herramientas software muy potentes, para poder llevar a cabo dichos resultados a la realidad, realizando los respectivos ajustes. La definición de los criterios para la evaluación del desempeño no queda en un segundo nivel, ya que es uno de los temas centrales del trabajo de grado, y además no es poco confiable porque a través de una base teórica y usando una herramienta de simulación se pueden definir tales criterios para ser posteriormente probados y usados en la realidad (aspecto que puede ser desarrollado en futuros trabajos de grado).
- La definición de una red FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF es un aporte significativo como lo son los criterios mencionados anteriormente que permitan evaluar el desempeño de la red. Esta red se refiere a un esquema de red (modelo o abstracción de la realidad) propuesto en un entorno de simulación apropiado para el desarrollo del trabajo de grado. Lo que se va a validar es la incidencia que tiene el integrar un módulo RoF a una red FTTH-GPON *Triple Play* con respecto a los parámetros físicos OPM en el desempeño de la red FTTH-GPON *Quad Play* consolidada.
- Los trabajos consultados durante el proceso investigativo indican que se debe partir de una base teórica y referenciar otros trabajos relacionados con el tema. Cualquier trabajo propone una temática a desarrollar, y algunos utilizan una herramienta software de simulación para validar los resultados en concordancia con los fundamentos teóricos. De acuerdo con lo descrito se postulan las conclusiones del trabajo. Además, los pasos anteriores son necesarios antes de llevar una implementación a la realidad.

Como criterios teóricos se necesita precisar que todos los aspectos que se mencionan a continuación pertenecen a un conjunto de criterios que se encuentran enmarcados de manera implícita dentro de los capítulos 2 y 4 de este trabajo de grado. Es así como todo lo relacionado con OPM (es un modelo de referencia), BER (para el servicio de datos/voz debe ser menor que 10^{-9} , para el servicio de video debe ser menor que 10^{-7} y para el servicio de radio- telefonía celular- debe ser menor que 10^{-3}), diafonía (asegurar eficiente espaciamiento entre canales y considerar buen diseño de los demultiplexores), filtros ópticos (cuyo ancho de

banda es cuatro veces la velocidad de transmisión), espaciamentos DWDM; no linealidades, dispersión, atenuación, etc. ya se encuentran mencionados durante el monitoreo de los cuatro servicios, el cual se debe hacer tanto en el dominio temporal como en el espectral.

Complementando, desde la perspectiva de las técnicas utilizadas para atenuar las degradaciones, se encuentra:

- **Igualación de ganancia dinámica:** aunque no se utilizó en la simulación por estar fuera del contexto de trabajo, es importante resaltar que según [60], *“A fin de compensar la desviación de ganancia introducida por una larga cadena de amplificadores, se puede utilizar un OSA o un controlador de potencia óptica y filtros de aislamiento de ganancia ajustables integrados, que permiten lograr una buena igualación en todos los canales de la señal agregada de DWDM”*
- **Codificación de línea (formato de modulación):** en el diseño e implementación de la simulación se empleó el formato de modulación NRZ debido a que tiene mejor eficiencia espectral en comparación con el RZ que emplea un mayor ancho de banda. Además, como el contexto de trabajo es una red de acceso, RZ no es adecuado porque éste es más apropiado para grandes distancias y altas velocidades de transmisión [18].
- **Número de canales ópticos y su separación:** en el desarrollo de la simulación se operó con: 1, 2, 4, 8, 16, 32 y 64 canales, espaciados 0.8 nm para DWDM en la ventana de 1550 nm. Un aspecto clave para resaltar es el hecho de que el número máximo de canales DWDM cuyo desempeño es aceptable disminuye con el aumento de la longitud del enlace y/o la disminución de la separación del canal óptico, debido al efecto de la no linealidad óptica cada vez mayor cuando la velocidad de transmisión esta sobre los 10 Gbps [18].
- **Tipos de fibra:** dentro del diseño de la simulación se usaron tres tipos de fibra óptica, en concordancia con la información proporcionada en las recomendaciones ITU-T G. 652, G. 653, y G. 655, y en la página web del proveedor *Corning*. De esta manera, para el caso de un canal simple (sin multiplexación), se emplearon las fibras SMF-28, DSF, y *CorningLEAF*, y para el caso de multiplexación WDM, solamente se trabajó con los dos tipos de fibra apropiados para tal fin (SMF-28 y *CorningLEAF*). Lo anterior se debe a que en ciertas circunstancias, los distintos tipos de fibra, pueden tener sus ventajas e inconvenientes entre sí. A manera de ilustración, la dispersión cromática de la fibra SMF-28 (G.652) es mayor que la de las fibras DSF (G.653) y *corningLEAF* (G.655), y por lo tanto si se opera por encima de los 10 Gbps se podrían introducir los efectos no lineales; lo contrario ocurre en la ventana de 1310 nm, donde ésta presenta menor dispersión cromática que la DSF y *CorningLEAF* [18].
- **Mezcla de diferentes tipos de fibras en un tramo:** aunque no se utilizó en la simulación por estar fuera del contexto de trabajo, es importante resaltar que según [60], *“Una técnica que se puede utilizar*

para atenuar los efectos de la no linealidad óptica es mezclar expresamente en un mismo tramo fibras con diferentes características. Por ejemplo, un tramo que contiene a la vez fibras con dispersión positiva y negativa tendrá un alto valor de dispersión local (conveniente para reducir los efectos de la modulación de fase cruzada (XPM) y de la mezcla de cuatro ondas (FWM)) y una baja dispersión neta (lo cual reduce las necesidades de compensación de dispersión) “.

Para terminar, es preciso notar los siguientes aspectos:

- En los sistemas prácticos del mundo real es preciso tener en cuenta numerosos efectos que limitan la distancia de transmisión, reduciendo el máximo alcance. Sin embargo, es importante utilizar herramientas potentes de simulación que permitan obtener valores de referencia sobre el máximo alcance en condiciones ideales [60].
- Según [61], *“es imposible seleccionar un único valor para la máxima potencia óptica de entrada que permita obtener un factor Q mayor que 7. Esta restricción máxima de entrada puede utilizarse para identificar la región de mejor calidad de funcionamiento del sistema y puede determinarse por medio de simulaciones preliminares con los parámetros del sistema deseados (tipos de fibra, compensación de la dispersión, separación entre amplificadores, y separación entre canales)”*.
- Para la implementación del diseño se debe tener en cuenta la potencia de los transmisores (OLT); y en los receptores (ONT), la sensibilidad de estos dependiendo de los servicios que se pretendan ofrecer.
- La red GPON con arquitectura FTTH no establece el uso de repetidores (pasivas) en su red de distribución óptica y permite atender a una cantidad considerable de usuarios gracias a la tecnología de transmisión WDM.
- La BER permite hacer una estimación de la calidad de una señal; sin embargo, para tener una certeza sobre la integridad de la señal en determinado punto de la red, se debe determinar la SNR y el Factor Q, sin olvidar en ningún momento la potencia con la que se excita el fotodetector y permite recuperar la información dependiendo directamente de la sensibilidad del sensor. Finalmente, la potencia de entrada que percibe el receptor se ve afectada por múltiples factores, como son la atenuación, el ruido, el jitter y efectos propios de la fibra óptica.

5.4. RECOMENDACIONES.

Al hacer una simulación en primera instancia se deben realizar pruebas en concordancia con la teoría con el fin de definir cuáles son aplicables para el cumplimiento de los objetivos, recordando que en un proceso investigativo se puede concluir que un camino no es el adecuado.

Se recomienda utilizar los archivos de simulación que están en el CD para un mejor estudio de los resultados de simulación, usando la herramienta OptSim.

Es importante adoptar y aplicar una metodología de simulación que permita seguir un orden y realizar de manera organizada este proceso, esto permite alcanzar menor complejidad, mayor entendimiento y una adecuada implementación de los sistemas a simular.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

Se debe contar con un equipo de cómputo con alta capacidad de procesamiento y memoria de almacenamiento, ya que para sistemas complejos, la herramienta OptSim® demanda una gran cantidad de recursos para simular en su totalidad el sistema implementado y así mostrar óptimos resultados en el menor tiempo posible.

Tener en cuenta que para el tipo de redes estudiadas en este trabajo de grado, el tiempo de simulación en modo muestra debe ser mucho mayor que el sugerido por OptSim®, con el fin de obtener suficientes datos para su análisis y gráficos correctos (como el diagrama del ojo multinivel y el diagrama de constelación). Lo anterior se afirma con base en el comportamiento de los resultados de simular la red PON que OptSim®, en su modo muestra, brinda como referencia, la cual arroja gráficos que no permiten ser visualizados correctamente, y por tanto valores como el EVM solo pueden ser visualizados con la última versión de OptSim. Por lo tanto, de acuerdo a las pruebas realizadas en este trabajo de grado, se recomienda ejecutar las simulaciones con un tiempo de simulación mínimo de 512 ns.

Se debe tener una adecuada exploración, buen manejo y conocimiento detallado de la herramienta de simulación para evitar inconvenientes en el momento de la implementación, simulación y pruebas. Para lo anterior, se recomienda consultar y hacer un ejercicio de lectura minuciosa a los manuales o guías de usuario que ofrece la herramienta para su manejo.

Se recomienda aplicar el modelo de jerarquías de OptSim® cuando los módulos a utilizar, como el receptor, están conformados por una gran cantidad de componentes, esto con el fin de encapsularlos en un solo elemento, de tal manera que la red quede simplificada y mejor organizada.

Es necesario definir una metodología de simulación adecuada con el fin de asegurar que los resultados obtenidos sean los más aproximados a la realidad, de igual manera es importante leer detenidamente la bibliografía del software OptSim® de Synopsis para determinar las técnicas y estrategias más eficientes del proceso de simulación con el fin de realizar el mayor número de pruebas en el menor tiempo posible.

El desarrollo de proyectos basados en el diseño de redes de telecomunicaciones abarca una amplia sección de análisis que debe ser realizado detalladamente para cumplir a cabalidad con los objetivos propuestos, por ello es apropiado manejar una metodología eficiente que permita el desarrollo ordenado de ideas y un flujo eficiente de trabajo.

Se debe definir adecuadamente el alcance del proyecto al inicio del mismo, puesto que la temática de redes GPON es muy extensa y da lugar a una gran variedad ideas secundarias que pueden desviar el desarrollo apropiado de los objetivos propuestos en proyecto.

Es necesario realizar una constante búsqueda de información acerca de las redes FTTH-GPON, y de la tecnología RoF puesto que su estudio abarca temas muy extensos y su tecnología avanza diariamente al ser relativamente nueva en cuanto a su implementación para ofrecer servicios de telecomunicaciones.

5.5. PERSPECTIVAS (TRABAJOS FUTUROS).

Este trabajo de grado sirve como referencia para futuros trabajos de grado o proyectos que busquen definir criterios para la evaluación del desempeño de una red FTTH-GPON *Quad Play* real a través del monitoreo de sus cuatro servicios. Este trabajo de grado es importante ya que es un punto de partida con proyección a la investigación (futuro inmediato, destacándose la diafonía y las no linealidades, en una red con velocidades de transmisión superiores a 10Gbps), a la implementación a nivel de laboratorio (pruebas), y finalmente la implementación a nivel real (futuro lejano); es decir, sería evaluar el desempeño a nivel físico de la red propuesta para velocidades superiores a los 10Gbps.

A futuro es necesario analizar otras alternativas para incrementar la distancia máxima entre la OLT y las ONT, como por ejemplo, operar con otros elementos ópticos como amplificadores, regeneradores, etc., o usar diferentes formatos de codificación y modulación, analizando el alcance de las PON y teniendo presente la diferencia entre FTTx, PON y WDM-PON.

Además, analizar la incidencia cuando la velocidad de transmisión es superior a 10 Gbps cuando por ejemplo la dispersión por modo de polarización (PMD) es muy relevante.

En cuanto a costos, falta analizar la relación costo/beneficio para comparar el desempeño de cada fibra con su precio, y por ende conseguir el óptimo valor de dicha relación, con el fin de tomar la mejor decisión al aplicar este concepto en un proyecto real donde es importante al menos tener un estimativo de CAPEX y OPEX, más aún dentro del contexto de WDM-PON.

A continuación, se sugieren algunos posibles trabajos futuros en relación con OPM:

- OPM puede ser usado para realizar nuevos métodos de gestión de tráfico. La alta capacidad y prioridad de tráfico pueden ser sincronizadas dinámicamente para canales ópticos de alto desempeño.
- Las interacciones entre OPM y sistemas de gestión de elementos de red y red se convierten en inconvenientes críticos. Se originan interrogantes relacionados con la información que debería pasar alrededor de la red con el fin de mantener una gestión escalable de red, por ejemplo, OPM en el Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet (*IETF, Internet Engineering Task Force*).
- Profundizar en otros deterioros de transmisión notables en WDM dentro del contexto de redes metropolitanas y/o de larga distancia:
 - Ruido de amplificador. Distorsión y transientes de amplificador.
 - Dispersión por modo de polarización. Efectos de polarización. Efectos de interferencia.
 - Jitter timing,
 - Transferencia RIN del láser de bombeo. Distorsión de filtro óptico.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

Con el desarrollo del trabajo de grado, se han identificado nuevos trabajos de investigación, tales como:

- Analizar el impacto de la transmisión de televisión digital con otros niveles de modulación QAM, por ejemplo, 64-QAM y 256-QAM y otros tipos de modulación digital que también pueden ser utilizados para este servicio.
- Analizar el impacto del tipo de modulación óptica y el tipo de laser utilizados en la transmisión de RoF.
- Analizar otras tecnologías y estándares como 10-GEAPON teniendo en cuenta que la velocidad con la que opera es mayor y la cobertura que puede alcanzar es de aproximadamente 60 Km.
- Realizar un estudio del desempeño de servicios *Quad Play* considerando otros tipos de redes PON como DWDM-PON donde la cantidad de canales transmitidos, la velocidad de transmisión y la distancia son mayores, por lo que pueden presentarse efectos no deseados para los cuales se pueden proponer técnicas para que estos puedan ser compensados.
- Una de las principales características de una red en anillo es su capacidad de ser implementada con algún tipo de protección o redundancia en la parte física de la red, por lo cual se propone diseñar, implementar y evaluar mediante simulación, mecanismos de redundancia que permitan entregar servicios del tipo *Quad Play* de manera más segura ante un posible fallo en la integridad física de la red.
- La herramienta de simulación utilizada se caracteriza por permitir la realización de simulaciones a nivel físico, por lo que se propone explorar otras herramientas de simulación que permitan realizar investigaciones enmarcadas en tecnología GEAPON con niveles superiores, de tal manera que puedan implementarse protocolos como MPCP con el fin de estudiar el comportamiento de cada topología cuando se llevan a cabo transmisiones en sentido ascendente por parte de los terminales ONT.
- Estudio de factibilidad técnico-económico para la implementación de una red FTTH/GPON de cobertura nacional para brindar servicios *Quad Play* en Colombia.
- Análisis de la implementación de una red FTTH/NGPON de cobertura metropolitana para brindar servicios *Quad Play* en Colombia.
- Dimensionamiento para la implementación de una red FTTH/GPON para brindar servicios *Quad Play* al incluir telefonía celular en el hogar de los usuarios.
- Estudio del desempeño de servicios *Quad Play* de redes PON basadas en la tecnología DWDM para soportar una mayor densidad de usuarios utilizando un módulo desarrollado en MATLAB para OptSim.
- Estudio de la evolución de las redes Ópticas pasivas basado en sus capacidades de transmisión de datos, estabilidad y desempeño de parámetros físicos para usuarios suscritos a una red basada en la tecnología FTTH.

GLOSARIO

Absorción: Cantidad de atenuación óptica en la fibra generada por la transformación de potencia óptica en calor.

Ancho de banda óptico: En redes ópticas, es el rango de frecuencias dentro del cual una fibra óptica o un dispositivo terminal pueden transmitir datos o información.

APS: Mecanismo de conmutación que enruta el tráfico de las líneas principales a las líneas de protección para protegerlo de fallos o cortes de fibra.

Atenuación: Decremento en la potencia de la señal a lo largo de una fibra óptica. Es causada por una combinación de absorción y dispersión y es expresada usualmente en decibeles por kilómetro (dB/km).

Banda Ancha: Método de transmisión de datos en el cual múltiples señales comparten el ancho de banda de una portadora de alta frecuencia.

BER: Cantidad de bits transmitidos que son recibidos incorrectamente.

Canal: Ruta de comunicación o la señal enviada sobre la ruta. En WDM, un canal es asignado para especificar una longitud de onda.

Capacidad: Medida de la cantidad de información que un elemento de telecomunicaciones puede transportar o procesar. Puede ser expresada en bits por segundo (bps), o como el número de conexiones establecidas.

Demultiplexor: Módulo que separa dos o más señales que fueron combinadas por un equipo multiplexor compatible.

DFB: Diodo Láser de inyección construido con un enrejado de reflexión Bragg fuera de la región activa para suprimir los múltiples modos longitudinales y mejorar un solo modo longitudinal.

Diodo láser: Dispositivo semiconductor que emite luz coherente cuando es estimulado.

Dispersión: Ensanchamiento en el dominio del tiempo de una señal de luz causada por señales de luz viajando a diferentes velocidades a través de una fibra óptica. Puede ser causada por efectos modales o cromáticos.

Dispersión cromática: Propiedad de la fibra óptica por la cual las longitudes de onda en una fibra óptica viajan a diferentes velocidades y llegan a diferentes tiempos, resultando en una degradación de la señal recibida.

Dispersión material: Dispersión resultante de las diferentes velocidades de cada longitud de onda en una fibra.

Dispersión modal: Dispersión causada por las diferentes distancias de tránsito de los diferentes modos de propagación, que resultan en tiempos de llegada diferentes.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

Dispersión Rayleigh: Dispersión de luz que resulta de pequeñas heterogeneidades en la densidad o composición del material.

DSF: Tipo de fibra monomodo diseñada para tener dispersión cero en la región de 1550 nm. Trabaja pobremente para aplicaciones DWDM debido a sus altas no linealidades en el punto de dispersión cero.

EDFA: Dispositivo utilizado para amplificar señales ópticas. Estos, a diferencia de los regeneradores, no convierten la señal a formato eléctrico antes de amplificarla. En un EDFA las fibras son dopadas con erbio, el cual puede amplificar la luz en la región de 1550 nm cuando es bombeado un láser externo.

ESCON: Arquitectura de Conexión de Sistemas Empresariales. Desarrollada por IBM.

Espaciamiento de canal óptico: Separación, usualmente expresada como una frecuencia, entre longitudes de onda de canales adyacentes WDM.

Fiber Channel: Estándar que define canales de comunicación de computadores sobre fibra óptica a velocidades entre 132 y 1062.5 Mbps., sobre distancias de hasta 10 km.

Fibra monomodo: Fibra óptica de núcleo pequeño a través del cual solamente puede propagarse un modo.

Fibra oscura: Fibra óptica inactiva. Típicamente cuando la fibra es instalada parte de esta no es utilizada y permanece en reserva para uso futuro.

Fotodetector: Transductor optoelectrónico tal como un fotodiodo PIN o un fotodiodo de avalancha.

Fotodiodo: Dispositivo semiconductor que convierte luz en corriente eléctrica.

FSO: Transmisión de información codificada en luz punto a punto para cortas distancias a través de espejos utilizando el espacio libre como medio de transmisión.

FWM: Efecto no lineal que ocurre en los sistemas DWDM cuando múltiples longitudes de onda se mezclan para formar nuevas longitudes de onda. Este efecto es más predominante cerca al punto de dispersión cero y a espaciamientos pequeños de longitudes de onda.

GMPLS: Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo Generalizado. Conjunto de estándares de la IETF diseñados para permitir a los flujos de paquetes ser conmutados con base en etiquetas en vez de la dirección de destino. GMPLS está basado en el concepto de enrutamiento al extremo y conmutación en el núcleo, independientemente del protocolo.

Jitter: Variaciones en el tiempo, pequeñas y rápidas, de una señal o forma de onda debido a ruido, cambios en las características de los componentes, voltajes, sincronización, etc.

Lambda: Canal de datos en sistemas WDM asignados a una longitud de onda específica. Lambda y longitud de onda son términos intercambiables.

Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios *Quad Play* al integrar un módulo RoF

Láser: Originalmente era un acrónimo para Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. El láser es una fuente que produce luz coherente casi monocromática.

Latencia: Lapso necesario para que un paquete de información viaje desde la fuente hasta su destino.

Longitud de onda: Distancia entre puntos de fase correspondiente de dos ciclos consecutivos de una onda. En los sistemas WDM, longitud de onda es un término intercambiable con λ .

Longitud de onda central: Longitud de onda medida en el punto central de la potencia óptica efectiva de un láser.

MPLS: Conjunto de estándares de la IETF diseñados para permitir a los flujos de paquetes ser conmutados con base en etiquetas en vez de la dirección de destino. MPLS está basado en el concepto de enrutamiento al extremo y conmutación en el núcleo.

Multiplexor: Módulo que combina dos o más señales en una sola para ser transportada sobre una línea o fibra.

MUX: Ver Multiplexor.

NDSF: Tipo de fibra monomodo diseñada para tener dispersión cero en la región de 1310 nm.

No linealidad: Desviación de la linealidad en un circuito electrónico, dispositivo electro-óptico, o fibra, que genera componentes no deseados en una señal.

Núcleo: Porción central conductora de luz de una fibra óptica. Tiene un índice de refracción más alto que el revestimiento.

NZDSF: Tipo de fibra monomodo con dispersión modificada que tiene el punto de dispersión cero cerca de la ventana de 1550 nm pero fuera de la actual ventana usada para la transmisión de señales. Está diseñada para maximizar el ancho de banda óptico mientras disminuyen las no linealidades de la fibra.

OA: Dispositivo que amplifica una señal óptica sin convertirla a formato eléctrico, como por ejemplo un amplificador EDFA.

OADM: Multiplexor utilizado en redes ópticas que puede insertar o extraer longitudes de onda de una señal óptica sin necesidad de convertirla a formato electrónico.

OOK: Método de modulación de amplitud frecuentemente utilizado en comunicaciones ópticas, por el que un "1" lógico se codifica por la presencia de luz en el intervalo de bit correspondiente, mientras que un "0" lógico está representado por la ausencia de luz en dicho intervalo de bit.

OTDR: Instrumento usado en diseño y diagnóstico que localiza fallas o infiere atenuaciones en las redes ópticas.

Pérdidas de Inserción: Pérdida de potencia que resulta de la inserción de un componente, tal como un conector o empalme en un trayecto anteriormente continuo.

PMD: Propiedad inherente del medio óptico, causado por la diferencia en las velocidades de propagación de la luz en los estados ortogonales principales de polarización del medio de transmisión.

Presupuesto de pérdidas: Cantidad de atenuación total permitida en un sistema.

Presupuesto de pérdidas en enlace óptico: Rango de pérdidas ópticas sobre el cual una fibra óptica operará y cumplirá todas las especificaciones, expresado en forma relativa a la potencia de salida del transmisor.

Rango Dinámico: Se refiere al rango de potencias de operación comprendido entre una potencia máxima y una mínima.

Refracción: Cambio de dirección de un frente de onda cuando este pasa a través de un límite entre dos medios diferentes.

Regenerador: Dispositivo que regenera las señales ópticas al convertir pulsos ópticos en eléctricos, limpiando la señal eléctrica para eliminar el ruido, y convirtiéndola nuevamente a pulsos ópticos a la salida; también es llamado repetidor regenerativo.

Rejilla ITU: Designación estándar de longitudes de onda hecha por la ITU para los láser. Está basada en un espaciamiento de 100 GHz de frecuencia óptica con una frecuencia central de 193.1 THz. (1552.52 nm.).

SDH: Estándar europeo que define unas velocidades y formatos para la transmisión de señales ópticas sobre fibra.

SONET: Interfaz estándar desarrollada por Bellcore y ampliamente utilizada por la industria de telecomunicaciones para transporte síncrono de alta velocidad sobre fibra óptica.

Sensitividad: Mínima potencia aceptable en el receptor para poder recuperar la señal.

Soliton: Forma particular del pulso óptico y con altos niveles de potencia que toma partido de las no linealidades en la fibra con el fin de solucionar los efectos de ensanchamiento del pulso de la dispersión de velocidad de grupo, a velocidades de transmisión de datos superiores a 10 Gbps.

Transparencia de protocolo: Habilidad de un sistema para transportar información sin estar consciente de protocolos de nivel más alto.

Transponder: En un sistema DWDM, módulo que recibe una señal de entrada y la convierte en una longitud de onda para ser ópticamente multiplexada con otras.

WDM: Transmisión de dos o más señales sobre (en forma relativa) longitudes de onda ampliamente espaciadas, típicamente 850 y 1310 nm o 1533 y 1577 nm, en una sola fibra.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] CICOMRA, «Las posibilidades de las nuevas tecnologías audiovisuales en Argentina,» Argentina, 2007.
- [2] C. Sinisterra y A. Allende, «La convergencia y su impacto en la organización,» Madrid, España, 2008.
- [3] R. Tejedor Millan, «GPON (Gigabit Passive Optical Network),» *BIT n° 166, COIT & AEIT*, n° 166, enero 2008.
- [4] C. A. Suárez Fajardo , M. A. Cely-Mancipe , G. A. Puerto-Leguizamón y R. O. Muñoz-Ortiz , «Generación de señales para sistemas radio sobre fibra basados en combinación óptica,» *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 16, n° 4, pp. 585-598, octubre 2015.
- [5] C. Serpa Imbett, G. Varón Durán, J. J. Granada Torres y N. Guerrero González, «Hacia la próxima generación de sistemas de Radio sobre Fibra de banda ancha retos tecnológicos en la banda de las ondas milimétricas,» *Ingeniería & Desarrollo*, vol. 2, n° 29, pp. 242-265, Marzo 2011.
- [6] C. Suárez Fajardo y G. Leguizamón Puerto, «Analytical model of signal generation for radio over fiber systems,» *Dyna*, vol. 81, n° 188, pp. 26-33, 2014.
- [7] A. Arvizua, J. A. Reynoso Hernández, M. A. Chávez y J. Sánchez, «Foto-transceptor para sistemas RoF y RoFSO usando un mezclador opto-electrónico basado en PHEMT,» *Revista Mexicana de Física*, n° 58, pp. 339-347, 2012.
- [8] G. Narváez, «Análisis de sistemas de generación y transporte de señales de mmw en sistemas RoF a 60 GHz,» Tesis universidad politécnica de valencia, España, 2013.
- [9] G. Campos y P. Sagoval, «software de simulación de diferentes tipos de modulación de señales de radio frecuencia sobre fibra óptica.,» 2007.
- [10] R. O. Muñoz-Ortiz Rafael Oswaldo, G. A. Puerto-Leguizamón, C. A. Suárez-Fajardo Carlos Arturo y M. A. Cely Mancipe, «Generación de señales para sistemas radio sobre fibra basados en combinación óptica,» *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 16, n° 4, pp. 585-598, octubre 2015.
- [11] I. Tafur Monroy, N. Guerrero González y A. Caballero, «Convergencia de sistemas de comunicación ópticos e inalámbricos,» *optica pura y aplicada*, p. 83, febrero 2009.

- [12] L. Kazovsky, W. Shaw, D. Gutierrez, N. Cheng y W. Shing-Wa, «Next-Generation Optical Access Networks,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, n° 11, noviembre 2007.
- [13] A. Cooper, «'Fibre/radio' for the provision of cordless/mobile telephony services in the access network,» *Electronics Letters*, vol. 26, n° 24, agosto 2002.
- [14] J. Seoane, I. Monroy, K. Prince y P. Jeppesen, «Local-Oscillator-Free Wireless-Optical-Wireless Data Link at 1.25 Gbit/s over a 40 GHz Carrier Employing Carrier Preservation and Envelope Detection,» *Optical Society of America*, 2008.
- [15] N. J. Gomes, M. Morant, A. Alphones, B. Cabon, C. Lethien y M. Csörnyei, «Radio-over-fiber transport for the support of wireless broadband services [Invited],» *Journal of Optical Networking*, vol. 8, pp. 156-178, 2009.
- [16] Z. Jia, J. Yu, D. Qian, G. Ellinas y D. Chang, «Experimental Demonstration for Delivering 1-Gb/s OFDM Signals over 80-km SSMF in 40-GHz Radio-over-Fiber Access Systems,» in *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America)*, vol. JWA108, 2008.
- [17] A. Ng'oma, M. Sauer y F. Annunziata, «Simple Multi-Gbps 60 GHz Radio-over-Fiber Links Employing Optical and Electrical Data Up-Conversion and Feed-Forward Equalization,» in *Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America)*, n° OWF2, 2009.
- [18] A. Escallon y J. Barrios, «Criterios para el monitoreo del canal óptico y la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana WDM,» Trabajo de Grado. Universidad del Cauca. Popayán, 2008.
- [19] H. Zamora Farias, «"Multiplexación por Longitud de Onda en Redes Troncales de Fibra Óptica",» 1, Universidad Tecnica del Estado (USACH), 2000.
- [20] R. Rajiv y S. Cisco, «Optical Networking Technologies Rajiv Ramaswami, Cisco Systems. Optical Networking Technologies, "What Worked and What Didn't",» *Rajiv Ramaswami, Cisco Systems. Optical Networking Technologies/IEEE Communications Magazine.* , , vol. Vol. 44, n° No. 9, pp. 132-139, September 2006.
- [21] H. Technologies, «"Redes Ópticas DWDM",» [En línea]. Disponible: <http://www.huawei.com> .

- [22] R. I.-T. G.697, «Supervisión óptica para sistemas de multiplexación por división en longitud de onda densa»,» Junio, 2004..
- [23] I. Cisco Systems, «Introduction to DWDM for Metropolitan Networks»,» Cisco, 2000. [En línea]. Disponible: <http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/product/mels/dwdm/dwdm.pdf>.
- [24] k. D. C. y a. et, «Optical Performance Monitoring»,» *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, n° 1, pp. 294-304, January 2004.
- [25] L. Lopez, La técnica de modulación OFDM, Mexico, 2001.
- [26] P. Muñoz Mora, «E-Reding, trabajos y Proyectos de fin de carrera»,» 2012. [En línea]. Disponible: http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11254/fichero/5_CAPITULO+1.pdf.
- [27] J. P. Gallardo Moreno, «E-Reding»,» 2013.
- [28] Sker, «OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing),» 2016. [En línea]. Disponible: [https://pdac.miraheze.org/wiki/OFDM_\(Orthogonal_Frequency_Division_Multiplexing\)](https://pdac.miraheze.org/wiki/OFDM_(Orthogonal_Frequency_Division_Multiplexing)).
- [29] M. Weib, M. Huchard, A. Stohr y B. Charbonnier, «60-GHz photonic millimeter-wave link for short- to medium-range Wireless transmission pp to 12.5 Gb/s»,» *J. Lightw. Technol*, vol. 26, n° 15, pp. 2424-2429, Aug. 2008.
- [30] A. Stohr y A. Et, «60 GHz radio-over-fiber technologies for broadband Wireless services»,» *J. Optical Networking*, vol. 8, n° 5, pp. 471-487, May 2009.
- [31] N. Amagua y N. Mogro, «Análisis y simulación de un enlace de radio sobre fibra óptica (RoF) a 60 Ghz»,» Quito Ecuador, 2013.
- [32] C. Lin, J. Chen y P.-P. Chun, «Hybrid Optical Access Network Integrating Fiber-to-the-Home and Radio-Over-Fiber Systems»,» *IEEE Photonics Technol. Lett*, vol. vol.19, n° 8, pp. 610-612, April 2007.
- [33] G. Y.L, P. A, M. S y C. B, «Low-Cost Transparent Radio-Over-Fiber System for In-Building Distribution of UWB Signals»,» *J.Lightwave Tecnol*, vol. 27, n° 14, pp. 2649-2657, 2009.
- [34] 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/>.

- [35] Redes FTTx: Conceptos y Aplicaciones. [En línea]. Disponible:
<http://www.cicomra.org.ar/cicomra2/expocomm/TUTORIAL%209%20Lattanzi%20y%20Graf-%20IEEE.pdf>
- [36] M. Josan, «Cómo funciona una conexión de fibra. GPON y FTTH,» 17 Marzo 2017. [En línea]. Disponible e: <https://naseros.com/2017/03/13/como-funciona-una-conexion-de-fibra-gpon-y-ftth/>.
- [37] M. A. Moreton, «Mundo Telecomunicaciones,» 06 Noviembre 2011. [En línea]. Available: <https://martinmoreton.wordpress.com/2011/11/26/fttc-la-mejor-solucion-a-todos-nuestros-problemas/>.
- [38] Y. Marchukov, «“Desarrollo de una aplicación gráfica para el diseño de infraestructuras FTTH”,» Gandía, 2011.
- [39] J. M. C. Muñoz, « “Metodología para la Simulación de Equipos de Telecomunicaciones”,» Popayán, 1995.
- [40] I. VPIsystems, « VPItransmissionMaker™ WDM.,» VPIsystems, Inc., [En línea]. Disponible: <http://www.vpiphotonics.com/TMWDM.php>.
- [41] S. D. Software, «Optiwave Systems Inc.,» System Design Software, [En línea]. Disponible: <http://www.optiwave.us>.
- [42] O. S. Inc., «OptiSystem 6.0.,» Optiwave Systems Inc., [En línea]. Disponible: <http://www.optiwave.com/site/products/system.html>.
- [43] la.mathworks., «mathworks.,» Matlab, [En línea]. Disponible: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [44] 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.
- [45] Rsoft, «OptSim 4.6.,» Rsoft, [En línea]. Disponible: http://www.rsoftdesign.com/products/system_simulation/OptSim/.
- [46] J. G. Lopez, «Diseño de métodos cross layer cognitivos para redes de comunicación óptica de ráfagas (OBS),» Tesis Doctoral. Universidad del Cauca. Popayán, Colombia, 2014.
- [47] I. F. Velasco Andrade y M. A. Melo López, «Estudio de factibilidad técnico - económico para la implementación de una red FTTH/GPON en el contexto colombiano para servicios triple play,» Trabajo de Grado. Universidad del Cauca. Popayán, 2018.

- [48] I. RSoft Design Group, «OptSim Application Notes and Examples,» de *OptSim Application Notes and Examples*, 2001, p. 79.
- [49] G. Villareal-Revelo y J. Orozco-Arroyave, «Descripción y análisis de desempeño de sistemas de radio sobre fibra con enlaces de 900 MHz con modulaciones en fase y en cuadratura,» *Revista Politécnica ISSN 1900-2351*, 2013.
- [50] F. G. Marangione, «Modelo Simulink para redes de comunicaciones ópticas multiservicio,» 2007.
- [51] H. Florez, «Procesos de Ingeniería de Software,» *vinculos*, vol. 6, nº 1, 2009.