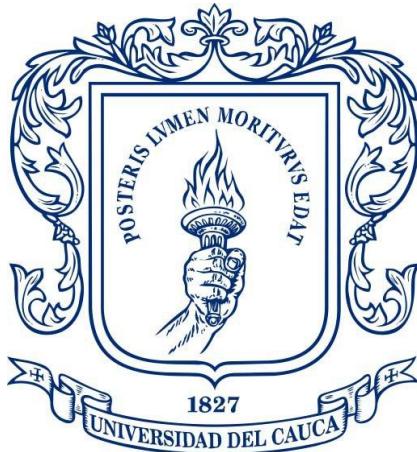


**EFFECTO DE LA TÉCNICA DE MODULACIÓN M-QAM PARA  
UNA INFRAESTRUCTURA DE RED CONVERGENTE  
OFDM-RoF/XG-PON A OFDM-RoF/XGS-PON**



Tesis de Pregrado en Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

***CRISTIAN DAVID QUILINDO MÉNDEZ  
EDUAR FERNANDO HOYOS ZÚÑIGA***

Director:  
*MSc. Gustavo Adolfo Gómez Agredo*

Codirector:  
*MSc. Andrés Felipe Escallón Portilla*

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Grupo I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones – GNTT  
Universidad del Cauca

Popayán, 2020

***CRISTIAN DAVID QUILINDO MÉNDEZ  
EDUAR FERNANDO HOYOS ZÚÑIGA***

***EFFECTO DE LA TÉCNICA DE MODULACIÓN M-QAM PARA  
UNA INFRAESTRUCTURA DE RED CONVERGENTE  
OFDM-RoF/XG-PON A OFDM-RoF/XGS-PON***

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
para optar por el título de:

Ingeniero en  
Electrónica y Telecomunicaciones

Director:  
*MSc. Gustavo Adolfo Gómez Agredo*

Codirector:  
*MSc. Andrés Felipe Escallón Portilla*

Popayán, 2020

*A mi madre dedico este triunfo,  
Quién me llenó de valor para perseverar ética y profesionalmente,  
A mi Dios todo poderoso, quien siempre cuidó de mí,  
“En hombros de gigantes”...*

*Cristian David Quilindo Méndez*

*Dedico este logro a mi familia,  
A todos los seres que hicieron parte de  
Este bello proceso de aprendizaje y formación,  
En especial a mi madre y tíos,  
Por el apoyo, motivación y paciencia,  
Estaré siempre agradecido...*

*Eduar Fernando Hoyos Zúñiga*

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos al MSc. Gustavo Adolfo Gómez Agredo, director del proyecto, y al MSc. Andrés Felipe Escallón Portilla, codirector del proyecto, por sus valiosas recomendaciones.

Al departamento de telecomunicaciones de la facultad de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca por sus aportes y recomendaciones, al Grupo de Investigación de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones - GNTT, por su colaboración y consejos en el desarrollo del presente trabajo y a todos los docentes que hicieron parte de este camino universitario, los cuales serán recordados con alegría.

También expresan un agradecimiento muy especial a sus familiares y amigos por su acompañamiento y apoyo incondicional, y sin las cuales no podríamos culminar satisfactoriamente esta etapa de nuestras vidas.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
<b>GENERALIDADES DE LA RED DE ACCESO ÓPTICA .....</b>	<b>15</b>
1.1. ARQUITECTURAS DE ACCESO EN REDES DE FIBRA.....	15
1.1.1. Red FTTH.....	16
1.1.2. Red PON.....	18
1.1.3. Redes de acceso FSAN.....	21
1.2. REDES CONVERGENTES.....	27
1.2.1. Radio over Fiber (RoF) .....	27
1.3. ESQUEMAS DE MODULACIÓN DIGITAL MULTINIVEL.....	36
1.3.1. M-PSK.....	36
1.3.2. M-QAM.....	38
1.3.3. Análisis comparativo esquemas modulación multinivel.....	42
1.4. ESQUEMAS DE MULTIPLEXACIÓN EN SISTEMAS ÓPTICOS .....	42
1.4.1. Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM) .....	42
1.4.2. Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM) .....	44
1.4.3. OFDM óptico.....	47
<b>HERRAMIENTAS, METODOLOGÍAS Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN .</b>	<b>51</b>
2.1. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN .....	51
2.1.1. MATLAB .....	51
2.1.2. OptiSystem .....	52
2.1.3. OptSim .....	53
2.1.4. Análisis comparativo herramientas de simulación .....	54
2.2. METODOLOGÍAS.....	55
2.2.1. Metodología de investigación .....	55
2.2.2. Metodología de simulación.....	57
2.2.3. Análisis comparativo metodologías de simulación .....	63
2.3. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN.....	63

2.3.1.	Modelo de red convergente OFDM-RoF de tipo XG-PON.....	65
2.3.2.	Métricas y casos de estudio .....	70

## **DISEÑO Y ANÁLISIS ARQUITECTURAS CONVERGENTES RoF-PON .... 75**

3.1.	ESCENARIO DE SIMULACIÓN XG-PON .....	75
3.1.1.	SISTEMA OFDM-RoF 4-QAM XG-PON.....	81
3.1.2.	SISTEMA OFDM-RoF 8-QAM XG-PON.....	87
3.1.3.	SISTEMA OFDM-RoF 16-QAM XG-PON.....	90
3.1.4.	SISTEMA OFDM-RoF 64-QAM XG-PON.....	93
3.2.	ESCENARIO DE SIMULACIÓN XGS-PON.....	97
3.2.1.	SISTEMA OFDM-RoF 4-QAM XGS-PON.....	97
3.2.2.	SISTEMA OFDM-RoF 8-QAM XGS-PON.....	101
3.2.3.	SISTEMA OFDM-RoF 16-QAM XGS-PON.....	103
3.2.4.	SISTEMA OFDM-RoF 64-QAM XGS-PON.....	106

## **CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS..... 111**

4.1.	CONCLUSIONES .....	111
4.2.	RECOMENDACIONES .....	113
4.3.	TRABAJOS FUTUROS .....	114

<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>115</b>
--------------------------	------------

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Escenarios de la red FTTx [9]. .....	16
Figura 1.2 - Topologías de red FTTx de tipo P2P y P2MP [8]. .....	17
Figura 1.3 - Arquitecturas de red FTTx [8]. .....	18
Figura 1.4 - Arquitectura PON convencional [12]. .....	19
Figura 1.5 - Evolución de las redes ópticas pasivas [13]. .....	20
Figura 1.6 - Arquitectura G-PON [11]. .....	21
Figura 1.7 - Arquitecturas FTTx para escenarios XG-PON [22]. .....	22
Figura 1.8 - Espectro de frecuencias en los sistemas PON [10]. .....	23
Figura 1.9 - Coexistencia de G-PON y XG-PON con opción de vídeo RF [22]. ...	24
Figura 1.10 - Arquitectura general RoF [1]. .....	28
Figura 1.11 - Diagrama de comunicaciones RoF [40]. .....	29
Figura 1.12 - Transporte de señal RoF entre CO y BS, enlace analógico [39]....	30
Figura 1.13 - Transporte de señal RoF entre CO y BS, enlace digital [42]. .....	30
Figura 1.14 - Modulación IM/DD [36]. .....	31
Figura 1.15 - Red de acceso heterogénea de próxima generación RoF [48].....	35
Figura 1.16 - Diagrama fasorial y diagrama constelación M-PSK [50]. .....	37
Figura 1.17 - Esquema en bloques de QAM [53]. .....	38
Figura 1.18 - Algunas constelaciones M-QAM [50]. .....	40
Figura 1.19 - Constelación 64-QAM rotada [53]. .....	41
Figura 1.20 - Sistema de comunicación óptico con WDM [60]. .....	43
Figura 1.21 - Comparación CWDM y DWDM [60]. .....	43
Figura 1.22 - OFDM en el dominio de la frecuencia [61]. .....	45
Figura 1.23 - Sistema de comunicaciones con OFDM [47]. .....	46
Figura 1.24 - Diagrama de bloques para IM/DD-OOFDM [45]. .....	48
Figura 1.25 - Diagrama de bloques para CO-OFDM [45]. .....	49
Figura 2.1 - Logo de la herramienta MATLAB [66]. .....	52
Figura 2.2 - Logo de la herramienta OptiSystem [67]. .....	53
Figura 2.3 - Logo de la herramienta OptSim [68]. .....	54

Figura 2.4 - Modelado en cascada [69] .....	55
Figura 2.5 - Cronograma de actividades.....	57
Figura 2.6 - Esquema de modelización para dinámica de sistemas [72] .....	58
Figura 2.7 - Algoritmo simplificado de simulación [28].....	60
Figura 2.8 - Metodología de simulación para la investigación [40].....	62
Figura 2.9 - Algoritmo de simulación [1] .....	64
Figura 2.10 - Escenario en bloques general RoF Digital [50]. .....	65
Figura 2.11 - Escenario RoF con modulación externa [45]. .....	66
Figura 2.12 - Coexistencia de XG-PON y XGS-PON [26]. .....	66
Figura 2.13 - Transmisor RF-OFDM en OptSim [40]. .....	67
Figura 2.14 - Receptor OFDM [40].....	69
Figura 2.15 - Modelo conceptual general.....	69
Figura 2.16 - Representación gráfica de EVM [40].....	72
Figura 2.17 - Escenarios de simulación, casos de estudio y métricas.....	74
Figura 3.1 - Escenario de simulación OFDM-RoF/XG-PON implementado. ....	80
Figura 3.2 - Datos generados. ....	81
Figura 3.3 - a) Diagrama de constelación señal 4-QAM en el transmisor. b) Diagrama constelación señal 4-QAM en el receptor back-to-back.....	82
Figura 3.4 - a) Diagrama de ojo señal “I” 4-QAM en el transmisor. b) Diagrama de ojo señal “I” 4-QAM en el receptor back-to-back.....	82
Figura 3.5 - a) Espectro señal “I” OFDM en el transmisor (verde). b) Espectro señal “I” OFDM (azul) en el receptor back-to-back.....	83
Figura 3.6 - Señal “I” OFDM en la frecuencia portadora RF.....	84
Figura 3.7 - a) Señal RoF en la OLT (verde). b) Señal RoF en la ONT (rojo).....	84
Figura 3.8 - Señal RF-OFDM a) transmitida (verde). b) Recibida ONT (azul). ....	85
Figura 3.9 - Señal “I” OFDM en ONT. a) Antes del filtro. b) Después del filtro.	85
Figura 3.10 - a) Diagrama de ojo señal “I” 4-QAM en el receptor. b) Diagrama de constelación 4-QAM en el receptor.....	86
Figura 3.11 - Señal RF-OFDM. a) Transmitida (verde). b) Recibida ONT (azul) ..	88
Figura 3.12 - a) Señal RoF en la OLT (verde). b) Señal RoF en la ONT (rojo)....	88
Figura 3.13 - a) Diagrama de ojo señal “I” 8-QAM en el receptor. b) Diagrama de constelación 8-QAM en el receptor.....	89

---

Figura 3.14 - Señal RF-OFDM. a) Transmitida (verde). b) Recibida ONT (azul) ..	91
Figura 3.15 - a) Señal RoF en la OLT (verde). b) Señal RoF en la ONT (rojo).....	91
Figura 3.16 - a) Diagrama de ojo señal “I” 16-QAM en el receptor. b) Diagrama de constelación señal 16-QAM en el receptor.....	92
Figura 3.17 - Señal RF-OFDM. a) Transmitida (verde). b) Recibida ONT (azul) ..	94
Figura 3.18 - a) Señal RoF en la OLT (verde). b) Señal RoF en la ONT (rojo).....	94
Figura 3.19 - a) Diagrama de ojo señal “I” 64-QAM en el receptor. b) Diagrama de constelación señal 64-QAM en el receptor.....	95
Figura 3.20 - SNR [dB] vs Distancia [km] para Modulación M-QAM a 2.5 Gbps. .	96
Figura 3.21 - BER vs SNR para M-QAM en el sistema OFDM-RoF/XG-PON. ....	96
Figura 3.22 - Diagrama de constelación señal 4-QAM a 13 km de fibra óptica....	98
Figura 3.23 - Señal RF-OFDM. a) Transmitida (verde). b) Recibida ONT (azul)..	99
Figura 3.24 - a) Señal RoF en la OLT (verde). b) Señal RoF en la ONT (rojo)....	99
Figura 3.25 - a) Diagrama de ojo señal “I” 4-QAM en el receptor. b) Diagrama de constelación señal 4-QAM en el receptor. ....	100
Figura 3.26 - Señal RF-OFDM. a) Transmitida (verde). b) Recibida ONT (azul). 101	101
Figura 3.27 - a) Señal RoF en la OLT (verde). b) Señal RoF en la ONT (rojo)... 102	102
Figura 3.28 - a) Diagrama de ojo señal “I” 8-QAM en el receptor. b) Diagrama de constelación señal 8-QAM en el receptor. ....	102
Figura 3.29 - Señal RF-OFDM. a) Transmitida (verde). b) Recibida (azul). ..	104
Figura 3.30 - a) Señal RoF en la OLT (verde). b) Señal RoF en la ONT (rojo)... 105	105
Figura 3.31 - a) Diagrama de ojo señal “I” 16-QAM en el receptor. b) Diagrama de constelación señal 16-QAM en el receptor.....	105
Figura 3.32 - Señal RF-OFDM. a) Transmitida (verde). b) Recibida ONT (azul). 107	107
Figura 3.33 - a) Señal RoF en la OLT (verde). b) Señal RoF en la ONT (rojo)... 107	107
Figura 3.34 - a) Diagrama de ojo señal “I” 64-QAM en el receptor. b) Diagrama de constelación señal 64-QAM en el receptor.....	108
Figura 3.35 - SNR [dB] vs Distancia [km] para Modulación M-QAM a 10 Gbps. 109	109
Figura 3.36 - BER vs SNR para M-QAM en el sistema OFDM-RoF/XGS-PON.. 109	109

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 – Características generales de redes tipo XGS-PON [28] .....	25
Tabla 1.2 – Características generales para redes NG-PON2 [28].....	26
Tabla 1.3 – Análisis comparativo de tecnologías PON. ....	26
Tabla 1.4 – Cambios de fase en 8-PSK. ....	38
Tabla 1.5 – Tabla comparativa M-PSK vs M-QAM.....	42
Tabla 2.1 – Tabla comparativa herramientas de simulación. ....	54
Tabla 2.2 – Características de las metodologías estudiadas. ....	63
Tabla 2.3 – Configuración de parámetros globales. ....	70
Tabla 3.1 – Distancia máxima alcanzada 4-QAM/XG-PON. ....	76
Tabla 3.2 – Resultados modelo de red OFDM-RoF/XG-PON 4-QAM.....	86
Tabla 3.3 – Distancia máxima alcanzada 8-QAM/XG-PON. ....	87
Tabla 3.4 – Resultados modelo de red OFDM-RoF/XGS-PON 8-QAM.....	89
Tabla 3.5 – Distancia máxima alcanzada 16-QAM/XG-PON.....	90
Tabla 3.6 – Resultados modelo de red OFDM-RoF/XG-PON 16-QAM.....	92
Tabla 3.7 – Distancia máxima alcanzada 64-QAM/XG-PON.....	93
Tabla 3.8 – Resultados modelo de red OFDM-RoF/XG-PON 64-QAM.....	95
Tabla 3.9 – Configuraciones modelo de red convergente OFDM-RoF/XGS-PON.	97
Tabla 3.10 – Distancia máxima alcanzada 4-QAM/XGS-PON. ....	98
Tabla 3.11 – Resultados modelo de red OFDM-RoF/XGS-PON 4-QAM.....	100
Tabla 3.12 – Distancia máxima alcanzada 8-QAM/XGS-PON. ....	101
Tabla 3.13 – Resultados modelo de red OFDM-RoF/XGS-PON 8-QAM.....	103
Tabla 3.14 – Distancia máxima alcanzada 16-QAM/XGS-PON.....	104
Tabla 3.15 – Resultados modelo de red OFDM-RoF/XGS-PON 16-QAM.....	106
Tabla 3.16 – Distancia máxima alcanzada 64-QAM/XGS-PON.....	106
Tabla 3.17 – Resultados modelo de red OFDM-RoF/XGS-PON 64-QAM.....	108
Tabla 4.1 – Análisis comparativo técnica de modulación M-QAM para OFDM-RoF/XG-PON a OFDM-RoF/XGS-PON. ....	113

## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

- ACO-OFDM:** (Asymmetrically Clipped O-OFDM). O-OFDM Recortado Asimétricamente.
- ADC:** (Analog to Digital Converter). Conversor Analógico a Digital.
- ADSL:** (Asymmetric Digital Subscriber Line). Línea de Abonado Digital Asimétrica.
- AON:** (Active Optical Network). Red Óptica Activa.
- APK:** (Amplitude-phase Keying). Modulación de Amplitud-Fase.
- ASK:** (Amplitude Shift Keying). Modulación por Desplazamiento de Amplitud.
- ATM:** (Asynchronous Transfer Mode). Modo de Transferencia Asíncrono.
- BER:** (Bit Error Rate). Tasa de Error de Bit.
- BPF:** (Band-Pass Filter). Filtro Pasa Banda.
- BPSK:** (Binary Phase Shift Keying). Modulación por Desplazamiento de Fase Binario.
- CATV:** (Community Antenna Television). Antena de Televisión Comunitaria.
- CBU:** (Cellular Backhaul Unit). Unidad de Backhaul Celular.
- CO:** (Central Office). Oficina Central.
- CO-OFDM:** (Coherent Optical OFDM). OFDM Óptica Coherente.
- CP:** (Cyclic Prefix). Prefijo Cíclico.
- CW:** (Continue Wave). Onda Continua.
- CWDM:** (Coarse Wavelength Division Multiplexing). Multiplexación Amplia por División de Longitud de onda.
- DAC:** (Digital to Analog Converter). Conversor Digital a Analógico.
- DBA:** (Dynamic Bandwidth Allocation). Asignación Dinámica de Ancho de Banda.
- DCO-OFDM:** (DC-biased O-OFDM). OFDM Óptico con sesgo de DC.
- DD:** (Direct Detection). Detección Directa.
- DMT:** (Discrete Multi-tone). Multi-tono Discreto.
- DSB-SC:** (Double-sideband suppressed-carrier transmission). Transmisión de Portadora Suprimida de Doble Banda Lateral.
- DVB-T:** (Digital Video Broadcasting-Terrestrial). Radiodifusión de Video digital Terrestre.
- EAM:** (Electro-Absorption Modulator). Modulador de Electro-Absorción.
- EDFA:** (Erbium-Doped Fiber Amplifier). Amplificador de Fibra Dopada con Erbio.
- EML:** (Externally Modulated Laser). Láser Modulado Externamente.
- EON:** (Elastic Optical Network). Red Óptica Elástica.
- FFT:** (Fast Fourier Transform). Transformación Rápida de Fourier.
- FSAN:** (Full Service Access Network). Red de Acceso de Servicio Completo.

<b>FSK:</b>	(Frequency Shift Keying). Modulación por Desplazamiento de Frecuencia.
<b>FSO:</b>	(Free Space Optics). Óptica de Espacio Libre.
<b>FTTB:</b>	(Fibre To The Building). Fibra Hasta El Edificio.
<b>FTTC:</b>	(Fibre To The Curb). Fibra Hasta La Acera.
<b>FTTDp:</b>	(Fibre To The Distribution point). Fibra Hasta El punto de Distribución.
<b>FTTH:</b>	(Fiber to the Home). Fibra Óptica Hasta el Hogar.
<b>FTTN:</b>	(Fibre To The Node). Fibra Hasta El Nodo.
<b>GEM:</b>	(G-PON Encapsulation Method). Método de Encapsulación de G-PON.
<b>G-PON:</b>	(Gigabit-capable passive optical networks). Redes Ópticas Pasivas con Capacidad de Gigabit.
<b>GSM:</b>	(Global System for Mobile). Sistema Mundial para la telefonía Móvil.
<b>HDTV:</b>	(High Definition Television). Televisión de Alta Definición.
<b>IEEE:</b>	(Institute of Electrical and Electronics Engineers). Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
<b>IF:</b>	(Intermediate Frequency). Frecuencia Intermedia.
<b>IFFT:</b>	(Inverse Fast Fourier Transform). Transformación Rápida Inversa de Fourier.
<b>IM:</b>	(Intensity Modulation). Modulación de la Intensidad.
<b>IP:</b>	(Internet Protocol). Protocolo de Internet.
<b>IPTV:</b>	(Internet Protocol Television). Televisión por el Protocolo Internet.
<b>ISDN:</b>	(Integrated Services Digital Network). Red Digital de Servicios Integrados.
<b>ISI:</b>	(Intersymbol Interference). Interferencia Entre símbolos.
<b>ITU:</b>	(International Telecommunication Union). Unión Internacional de Telecomunicaciones.
<b>LAN:</b>	(Local Area Network). Red de Área Local.
<b>LTE:</b>	(Long Term Evolution). Evolución a Largo Plazo.
<b>MCM:</b>	(Multi-carrier modulation). Modulación Multiportadora.
<b>MDU:</b>	(Multi Dwelling Unit). Unidad de Viviendas Múltiples.
<b>MMW:</b>	(Millimeter-Wave). Onda Milimétrica.
<b>M-PSK:</b>	(M-ary Phase-Shift Keying). Modulación de Desplazamiento de Fase M-aria.
<b>M-QAM:</b>	(M-ary Quadrature Amplitude Multiplexing). Modulación de Amplitud en Cuadratura M-aria.
<b>MTU:</b>	(Multi Tenant Unit). Unidad de Inquilinos Múltiples.
<b>MZM:</b>	(Mach-Zehnder Modulator). Modulador Mach-Zehnder.
<b>NGN:</b>	(Next Generation Network). Red de Próxima Generación.
<b>NG-PON:</b>	(Next Generation Passive Optical Network). Red Óptica Pasiva de Próxima Generación.
<b>NRZ:</b>	(Non Return to Zero). No Retorno a Cero.
<b>ODN:</b>	(Optical Distribution Network). Red de Distribución Óptica.

---

<b>OFDM:</b>	(Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal.
<b>OLT:</b>	(Optical Line Termination). Terminación de la Línea Óptica.
<b>ONT:</b>	(Optical Network Terminal). Terminal de Red Óptica.
<b>ONU:</b>	(Optical Network Unit). Unidad de Red Óptica.
<b>O-OFDM:</b>	(Optical OFDM). OFDM Óptico.
<b>OPM:</b>	(Optical Performance Monitoring). Monitoreo de Desempeño Óptico.
<b>OSNR:</b>	(Optical Signal to Noise Ratio). Relación Señal a Ruido Óptica.
<b>P2MP:</b>	(Point to Multi-Point). Punto a Multi Punto.
<b>P2P:</b>	(Point to Point). Punto a Punto.
<b>PAPR:</b>	(Peak-to-Average-Power Ratio). Potencia Pico a Potencia Promedio.
<b>PLL:</b>	(Phase-Locked Loop). Lazo de Seguimiento de Fase.
<b>PON:</b>	(Passive Optical Network). Red Óptica Pasiva.
<b>POP:</b>	(Point Of Presence). Punto De Presencia.
<b>PSK:</b>	(Phase Shift Keying). Modulación de Desplazamiento de Fase.
<b>PSTN:</b>	(Public Switched Telephone Network). Red Telefónica Pública Comutada.
<b>QAM:</b>	(Quadrature Amplitude Multiplexing). Modulación de Amplitud en Cuadratura.
<b>QoS:</b>	(Quality of Service). Calidad de Servicio.
<b>RF:</b>	(Radio Frequency). Radio Frecuencia.
<b>RoF:</b>	(Radio over Fiber). Radio sobre Fibra.
<b>RTO:</b>	(RF To Optical). RF a Óptico.
<b>SBU:</b>	(Small Business Unit). Unidad de Pequeñas Empresas.
<b>SCM:</b>	(Subcarrier Multiplexing). Multiplexación por Subportadora.
<b>SER:</b>	(Symbol Error Rate). Tasa de Error de Símbolo.
<b>SFU:</b>	(Single Family Unit). Unidad de Familia Única.
<b>SNR:</b>	(Signal Noise Relation). Relación Señal a Ruido.
<b>SR-DBA:</b>	(Status Reporting DBA). DBA con Reporte de Estado.
<b>SSMF:</b>	(Standard Single Mode Fiber). Fibra Monomodo Estándar.
<b>SSP:</b>	(Signal Space Diversity). Diversidad del Espacio de Señales.
<b>TDMA:</b>	(Time Division Multiple Access). Acceso Múltiple por División de Tiempo.
<b>TM-DBA:</b>	(Traffic Monitoring DBA). DBA con Monitoreo de Tráfico.
<b>UMTS:</b>	(Universal Mobile Telecommunications System). Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles.
<b>VoIP:</b>	(Voice over IP). Voz sobre Protocolo de Internet.
<b>WDM:</b>	(Wavelength Division Multiplexing). Multiplexación por División de Longitud de Onda.
<b>WiMax:</b>	(Worldwide Interoperability for Microwave Access). Interoperabilidad Mundial para el Acceso de Microondas.

---

**XG-PON:** (10-Gigabit-capable Passive Optical Network). Red Óptica Pasiva con capacidad de 10 Gbps.

**XGS-PON:** (10-Gigabit-capable Symmetric Passive Optical Network). Red Óptica Pasiva con capacidad Simétrica de 10 Gbps.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la convergencia tecnológica se ha planteado como respuesta para satisfacer los requisitos de acceso de banda ancha y seguridad en la red inalámbrica; la comunicación por fibra óptica utiliza eficientemente el ancho de banda disponible, de manera que maneja gran capacidad de transmisión de datos, así como la ventaja de tener inmunidad ante las interferencias electromagnéticas, mientras que las redes inalámbricas permiten movilidad de los usuarios. Gracias a la digitalización, las redes de telecomunicaciones son más eficientes a un menor costo, además de que permiten la introducción de nuevos servicios y aplicaciones como: vídeo conferencia, servicios multimedia online, vídeo bajo demanda, y demás. No obstante, dado que el ancho de banda de los servicios inalámbricos y la degradación de la señal inalámbrica a lo largo de un canal de transmisión no permiten una alta velocidad de transmisión de datos, es importante impulsar la convergencia entre tecnologías inalámbricas y ópticas hasta la última milla, definido como FTTH (*Fiber To The Home, Fibra Óptica Hasta el Hogar*) y arquitecturas RoF (*Radio Over Fiber, Radio Sobre Fibra*) [1].

En la actualidad, los servicios de comunicación móvil e inalámbrica de próxima generación ofrecen movilidad, flexibilidad y conectividad a los usuarios finales, así como acceso directo a gran cantidad de nuevos servicios y aplicaciones de banda ancha que requieren una utilización eficiente de recursos. Una de las técnicas de modulación con mayor despliegue en las comunicaciones inalámbricas es QAM (*Quadrature Amplitude Multiplexing, Modulación de Amplitud en Cuadratura*), la cual ofrece menor probabilidad de ISI (*Inter Symbol Interference, Interferencia entre Símbolos*) frente a otras técnicas de modulación digital. Con el desarrollo de formatos avanzados de modulación, como OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal*), que permite el envío simultáneo de varias subportadoras QAM independientes, se mejora el rendimiento total de la red y se crea un sistema más robusto, sin embargo, con el desarrollo de la fibra óptica y las redes basadas en paquetes, los esquemas de modulación como M-QAM, buscan transportar mayor cantidad de bits por símbolo a velocidades de transmisión de datos superiores [2].

Si bien es cierto que las comunicaciones ópticas e inalámbricas se establecen entre los años 70-80s, la convergencia de estas dos redes en una tecnología como RoF es tema de constante investigación en la actualidad. Algunos autores como en [3], [4], argumentan que es posible desarrollar un estándar de comunicación que utiliza eficientemente las ventajas de la fibra óptica en el contexto de una infraestructura de red convergente OFDM-RoF. Es por estos motivos que se proyecta analizar, ¿cuál efecto de la técnica de modulación M-QAM en la migración de una red de acceso basada en la recomendación XG-PON (*10-Gigabit-capable Passive Optical Network, Red Óptica Pasiva con capacidad de 10 Gbps*), hacia una red de acceso XGS-PON (*10-Gigabit-capable Symmetric Passive Optical Network, Red Óptica Pasiva con capacidad Simétrica de 10 Gbps*), dentro del marco de una infraestructura de red convergente OFDM-RoF?.

## **CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LA RED DE ACCESO ÓPTICA**

Se especificaron aspectos sobre arquitecturas de acceso en redes de fibra óptica, la convergencia de tecnologías de telecomunicaciones en los últimos años, así como esquemas de modulación y multiplexación digital avanzados. El marco teórico es la base con la cual se aborda cualquier proyecto de investigación y por tanto, es necesario definir cada temática que se presente dentro del contexto de la investigación a fin de comprender aspectos relacionados con simulaciones, gráficas y datos.

## **CAPÍTULO 2. HERRAMIENTAS, METODOLOGÍAS Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN**

En el presente capítulo se responden preguntas sobre, ¿cuál es la mejor herramienta a utilizar dentro de la investigación? y ¿cuáles son las metodologías que mejor responden a los objetivos propuestos dentro de la investigación?, así mismo, se definen los escenarios de simulación sobre los cuales se va a realizar un modelo de red dentro de la herramienta de simulación, esta última sección precisa un modelo conceptual general de la red a simular, las métricas que se van a utilizar para evaluar el efecto de la técnica de modulación M-QAM, y los diferentes casos de estudio planteados para abordar un análisis del sistema.

## **CAPÍTULO 3. DISEÑO Y ANÁLISIS DE ARQUITECTURAS CONVERGENTES RoF-PON**

Se presenta un diseño e implementación a nivel de simulación de un modelo de red convergente, a partir del modelo conceptual descrito en el anterior capítulo; así mismo, sobre cada escenario de simulación y dentro de un caso de estudio específico se presenta el análisis de los diferentes parámetros OPM. Alguno de los aspectos más importantes a detallar del presente capítulo es el análisis de la constelación, con el fin de evaluar el efecto de la técnica de modulación M-QAM para el modelo de red convergente, cuando se realiza la migración de una tecnología XG-PON a XGS-PON.

## **CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

En el presente capítulo se documentan las conclusiones de la investigación con base en el análisis de simulación presentado en el capítulo anterior, por otra parte, es pertinente definir las recomendaciones que fueron importantes en la investigación, y finalmente, se presentan los trabajos futuros en los cuales se puede seguir abarcando el contexto de la temática, alrededor del efecto de una técnica de modulación M-QAM para una infraestructura de red convergente, extendiendo así la línea de investigación.

## ABSTRACT

In recent years, technological convergence has emerged as a response to meet the requirements of broadband access and security in the wireless network; fiber optic communication efficiently uses the available bandwidth, so it handles large data transmission capacity, as well as the advantage of having immunity to electromagnetic interference, while wireless networks allow user mobility. Thanks to digitalization, telecommunication networks are more efficient at a lower cost, besides allowing the introduction of new services and applications such as: video conferencing, online multimedia services, video on demand, and so on. However, since the bandwidth of wireless services and the degradation of the wireless signal along a transmission channel do not allow high data rates, it is important to drive the convergence between wireless and optical technologies to the last mile, defined as FTTH (Fiber To The Home) and RoF (Radio Over Fiber) architectures [1].

Today's next-generation mobile and wireless communication services offer mobility, flexibility and connectivity to end users, as well as direct access to many new resource-efficient broadband services and applications. One of the most widely deployed modulation techniques in wireless communications is QAM (Quadrature Amplitude Multiplexing), which offers a lower probability of ISI (Inter Symbol Interference) compared to other digital modulation techniques. With the development of advanced modulation formats, such as OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), which allows the simultaneous sending of several independent QAM sub-carriers, the overall performance of the network is improved and a more robust system is created. However, with the development of optical fiber and packet-based networks, modulation schemes such as M-QAM, seek to transport more bits per symbol at higher data rates [2].

While it is true that optical and wireless communications were established between the 70s and 80s, the convergence of these two networks in a technology like RoF is a subject of constant research today. Some authors as in [3], [4], argue that it is possible to create a strong communication standard that efficiently uses the advantages of fiber optics in the context of a converged OFDM-RoF network infrastructure. It is for these reasons that it is planned to analyze, what effect of M-QAM modulation technique in the migration of an access network based on the XG-PON (10-Gigabit-capable Passive Optical Network) recommendation, to an XGS-PON (10-Gigabit-capable Symmetric Passive Optical Network) access network, within the framework of a converged OFDM-RoF network infrastructure?

## **CHAPTER 1. GENERALITIES OF THE OPTICAL ACCESS NETWORK**

Aspects of access architectures in optical fiber networks, the convergence of telecommunications technologies in recent years, as well as advanced digital modulation and multiplexing schemes were specified. The theoretical framework is the basis with which any research project is approached and therefore, it is necessary to define each topic presented within the context of the research in order to understand aspects related to simulations, graphics and data.

## **CHAPTER 2. TOOLS, METHODOLOGIES AND SIMULATION SCENARIOS**

This chapter answers questions about what is the best tool to use in research. And which are the methodologies that better respond to the objectives proposed within the investigation? Likewise, the simulation scenarios on which a network model is going to be made within the simulation tool are defined, this last section specifies a general conceptual model of the network to be simulated, the metrics that are going to be used to evaluate the effect of the M-QAM modulation technique, and the different case studies proposed to approach a system analysis.

## **CHAPTER 3. DESIGN AND ANALYSIS OF CONVERGENT ARCHITECTURES RoF-PON**

A design and implementation at simulation level of a converged network model is presented, based on the conceptual model described in the previous chapter; likewise, on each simulation scenario and within a specific study case, the analysis of the different OPM parameters is presented. One of the most important aspects to be detailed in this chapter is the analysis of the constellation, in order to evaluate the effect of the M-QAM modulation technique for the converged network model, when migrating from a XG-PON to XGS-PON technology.

## **CHAPTER 4. CONCLUSIONS, RECOMMENDATIONS AND FUTURE WORK**

This chapter documents the conclusions of the research according to the simulation analysis presented in the previous chapter, on the other hand, it is relevant to define the recommendations that were important in the research, and finally, it presents the future work in which it is possible to continue covering the context of the subject, around the effect of an M-QAM modulation technique for a converging network infrastructure, thus extending the line of research.

## CAPÍTULO 1.

# GENERALIDADES DE LA RED DE ACCESO ÓPTICA

La red de acceso óptico es la tecnología más utilizada por los países desarrollados para mejorar el acceso de ancho de banda; las ventajas de la fibra óptica se observan en la baja atenuación que tiene por distancia, así como la eficiencia en el ancho de banda en comparación al cobre, bajo mantenimiento en las plantas de fibra y protección frente a ruido e interferencias electromagnéticas. Las redes de fibra llegan hasta las instalaciones de usuario en entornos residenciales y empresariales con el objetivo de responder a las demandas de alto ancho de banda y alta velocidad de transmisión de datos que requieren los clientes para sus servicios y aplicaciones multimedia [5].

En el desarrollo de este capítulo, se detallan las principales arquitecturas de acceso basadas en fibra óptica junto con sus respectivas ventajas y desventajas; así mismo, se presentan distintos esquemas de modulación y multiplexación que han emergido en el dominio óptico debido a la exigencia por altas velocidades de datos; también, algunas tecnologías de acceso híbrido que se han desarrollado con el propósito de unificar las ventajas de distintas tecnologías e implementarlas en la última milla. Desde la perspectiva del proveedor de servicio, lo anterior presenta elementos específicos pertinentes para el desarrollo de la investigación; el objetivo es caracterizar la línea de investigación y ofrecer un soporte teórico al lector.

### 1.1. ARQUITECTURAS DE ACCESO EN REDES DE FIBRA

A finales de los 90's, un grupo internacional de operadores de red realizó un esfuerzo en conjunto para definir una familia de arquitecturas de acceso de banda ancha basado en fibra óptica, tuvieron en cuenta la importancia de lograr una red de acceso de banda ancha económicamente viable, así nace la iniciativa del grupo de trabajo FSAN (*Full Service Access Network, Red de Acceso de Servicio Completo*), impulsado por una creciente demanda de servicios de alta velocidad de datos y por la voluntad de estandarizar los avances en distribución óptica y la tecnología ATM (*Asynchronous Transfer Mode, Modo de Transferencia Asíncrono*) [6].

Con el desarrollo de Internet, video bajo demanda, IPTV (*Internet Protocol Television, Televisión por el Protocolo Internet*), video conferencia, y demás servicios multimedia, se necesita de nuevos métodos de acceso que cumplan con los requerimientos de ancho de banda, QoS (*Quality of Service, Calidad de servicio*) e interoperabilidad con las redes de acceso convencionales. La redes PON (*Passive Optical Network, Red Óptica Pasiva*) y AON (*Active Optical Network, Red Óptica Activa*) buscan ofrecer servicios de alto ancho de banda a los usuarios finales, mediante estrategias como: utilización de elementos activos o pasivos en la red,

esquemas de modulación avanzados, altas velocidades de transmisión a grandes distancias y fibra óptica dedicada o compartida para cada usuario [5]. La red PON, por ejemplo, se ha empezado a desarrollar en redes de área metropolitana y redes de área local conocidas como FTTH, las ventajas incluyen una arquitectura P2MP (*Point to MultiPoint, Punto a Multipunto*), alta velocidad para el acceso a Internet y servicios triple play de alta calidad con capacidad para datos, voz y vídeo [7].

### 1.1.1. Red FTTH

Una red de acceso basada en fibra óptica se constituye como una red FTTH, en donde varios suscriptores, se conectan a un punto POP (*Point of Presence, Punto de Presencia*), oficina central o nodo de acceso, el cual contiene los sistemas de distribución ópticos necesarios para proveer de servicios y aplicaciones a los clientes, a su vez, los nodos de acceso se conectan a redes de fibra metropolitanas o redes más grandes; estas redes de acceso conectan grandes edificios, como escuelas, hospitales, empresas, hogares y negocios. Para el desarrollo de la red FTTH en medios físicos, como ciudades, áreas residenciales y rurales, se tienen en cuenta factores, como las inversiones de capital, gastos operativos, condiciones locales y arquitecturas de red FTTH, por ejemplo PON o Ethernet activo [8].

El despliegue de la fibra óptica para redes FTTx está limitado hasta un punto determinado de la red, en la figura 1.1 se presentan los diferentes tipos de redes FTTx. El punto alcanzado está determinado por la última letra, por ejemplo: FTTH, FTTB (*Fiber To The Building, Fibra Hasta El Edificio*), FTTC (*Fiber To The Curb, Fibra Hasta un Punto Remoto*), FTTN (*Fiber To The Node, Fibra Hasta El Nodo*), FTTA (*Fiber To The Antenna, Fibra Hasta La Antena*), FTTDp (*Fiber To The Distribution point, Fibra Hasta El punto de Distribución*), entre otras abreviaturas.

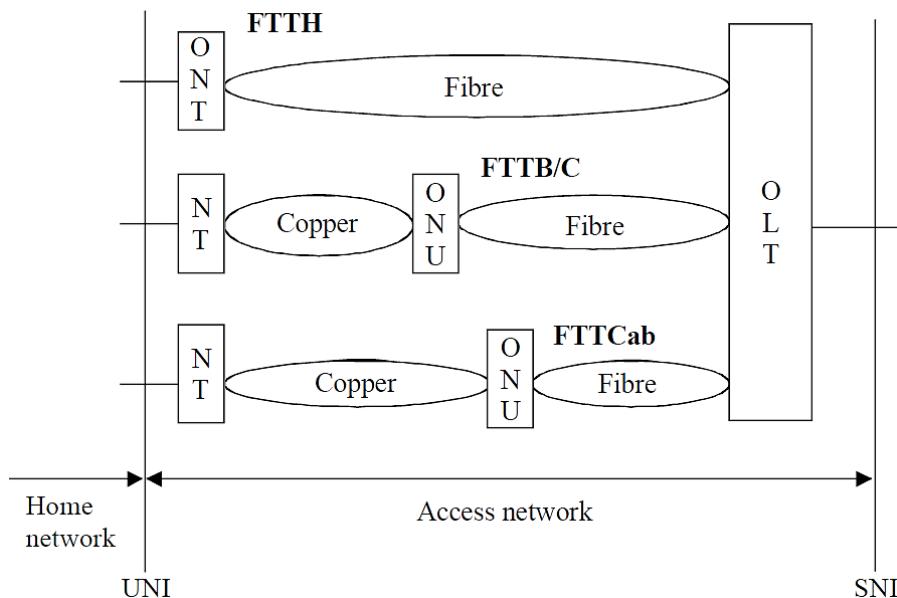


Figura 1.1 – Escenarios de la red FTTx [9].

### - Tecnologías y topologías FTTH

Las topologías utilizadas para el despliegue de la fibra óptica son diferentes a las tecnologías utilizadas para el transporte de los datos sobre la fibra óptica, así, la tecnología PON utiliza una topología P2MP y la tecnología AON conocida como Ethernet activo, utiliza las topologías P2P (*Point to Point, Punto a Punto*) y P2MP. La topología P2P para AON utiliza elementos Ethernet activos en la red ubicados en la oficina central, y permite que cada suscriptor tenga un medio de transmisión óptico dedicado con gran ancho de banda, pero requiere de gran inversión al desplegar la fibra óptica desde la oficina CO hasta las instalaciones de usuario; por su parte, la topología P2MP para AON permite la utilización de la fibra óptica desde la oficina central hasta un nodo remoto cerca del suscriptor, sin embargo, requiere de un consumo de potencia y mantenimiento adecuado del nodo remoto en la red. Por otro lado, la arquitectura P2MP para FTTH (también llamada PON), permite reducir los costos de la red utilizando elementos pasivos y la utilización de un mismo cable de fibra para distintos suscriptores, en la figura 1.2 se presentan los esquemas de las topologías. Los nodos remotos pueden ser activos tal como un switch Ethernet, o pasivos como divisores ópticos pasivos y acopladores WDM (*Wavelength Division Multiplexing, Multiplexación por División de longitud de Onda*) [10].

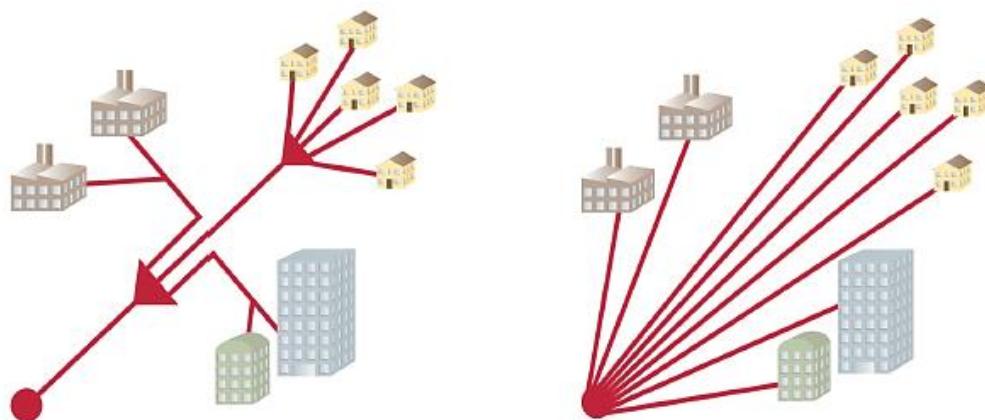


Figura 1.2 – Topologías de red FTTx de tipo P2P y P2MP [8].

La tecnología PON – P2MP y la tecnología Ethernet – P2P, son ampliamente aceptadas y comercializadas a nivel mundial, la elección depende de factores de costo – eficiencia para los proveedores de servicios y operadores de las redes [8]. En la figura 1.3 se presentan las diferentes arquitecturas de red FTTH.

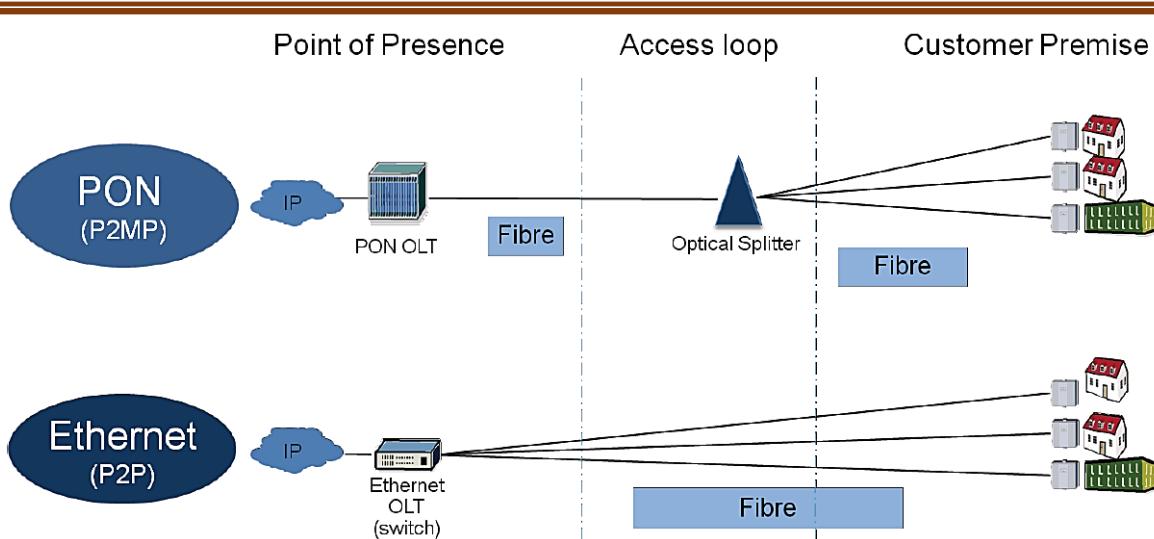


Figura 1.3 – Arquitecturas de red FTTx [8].

Actualmente, se habla de la similitud de la tecnología FTTH y PON, sin embargo, los sistemas FTTH son un concepto más general donde se incluye la tecnología PON. Por otra parte, la red FTTH define categorías de servicio, como: servicios de banda asimétricos, servicios de banda ancha simétricos, servicio telefónico tradicional y red digital de servicios integrados ISDN (*Integrated Services Digital Network, Red Digital de Servicios Integrados*), algunos ejemplos son: vídeo bajo demanda, servicios de radio difusión digital, juegos en línea, correo electrónico y demás [8].

### 1.1.2. Red PON

La demanda creciente de ancho de banda en las redes de acceso ha permitido el desarrollo de las redes PON con el objetivo de transportar por un hilo de fibra los servicios multimedia de los suscriptores, tales como telefonía tradicional, VoIP, video conferencia, vídeo bajo demanda, y demás; organizaciones como FSAN, ITU (*International Telecommunication Union, Unión Internacional de Telecomunicaciones*) y la IEEE (*Institute of Electricals and Electronics Engineers, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos*) se encargan actualmente de producir las especificaciones, normas de interoperabilidad y funcionamiento para el acceso de banda ancha a través de fibra óptica [11].

La principal característica de las redes PON es la no utilización de componentes de potencia intermedios entre el usuario final y el punto principal de distribución, lo cual reduce el consumo de potencia y los costos de operación y mantenimiento para los proveedores de servicios; en la figura 1.4 se observa que una PON convencional consiste de OLT (*Optical Line Terminal, Terminal de Línea Óptico*) ubicada en la oficina central, ODN (*Optical Distribution Network, Red de Distribución Óptica*) y ONU (*Optical Network Unit, Unidad de Red Óptica*); la red comprende una conexión por “fibra de alimentación” entre la OLT y el divisor óptico

pasivo, acto seguido, el divisor óptico pasivo separa la señal óptica en varias señales de baja potencia en dirección a cada ONU, mediante una “fibra de distribución”. La ONU es una interfaz de servicio con los suscriptores y la OLT se encarga de recibir los datos del proveedor de servicios, de tal manera que se brindan servicios como: PSTN (*Public Switched Telephone Network*, Red Telefónica Pública Comutada), Internet, CATV (*Community Antenna Television*, Antena de Televisión Comunitaria) y demás, para 16 a 128 suscriptores por canal en la red de distribución, sin embargo, la oferta de servicios y cantidad de suscriptores dependen del tipo de estándar utilizado en la red de acceso basada en fibra [12].

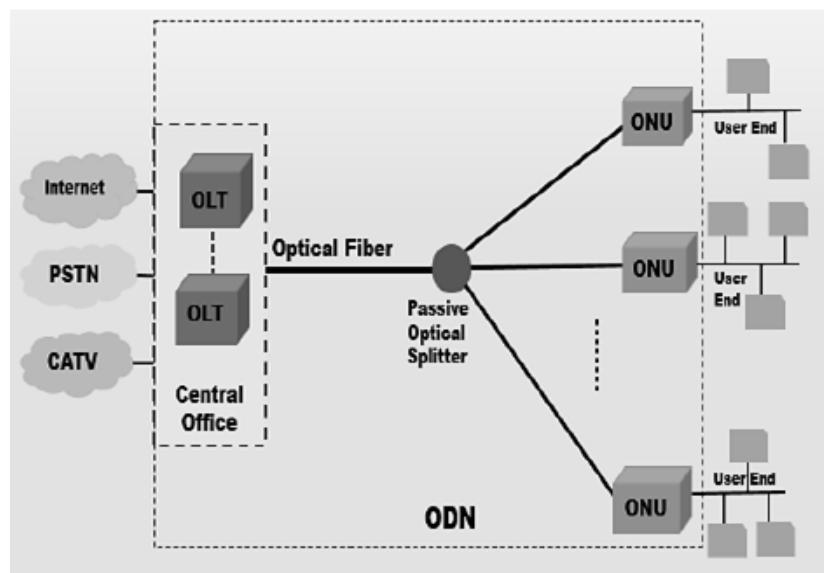


Figura 1.4 – Arquitectura PON convencional [12].

De la figura 1.4, se definen dos sentidos de señales transmitidas, como sentido de transmisión hacia el origen en el caso de ONU – OLT y sentido hacia el destino en el caso de OLT – ONU; así mismo, la ODN presentada se conoce como una arquitectura en estrella pasiva, sin embargo, este tipo de arquitectura requiere de técnicas de acceso eficientes, en el sentido de transmisión hacia el origen, para evitar los efectos de colisión de señales en el combinador óptico. Así, la primera generación de redes PON utilizaba el protocolo TDMA (*Time Division Multiplexing Access, Acceso Múltiple por División de Tiempo*) en el sentido de transmisión hacia el origen [8]. Por su parte, en la figura 1.5 se presenta la evolución de la tecnología en una línea de tiempo, donde se detallan aspectos como, el ente regulador, nombre del estándar y velocidades en el enlace ascendente y descendente.

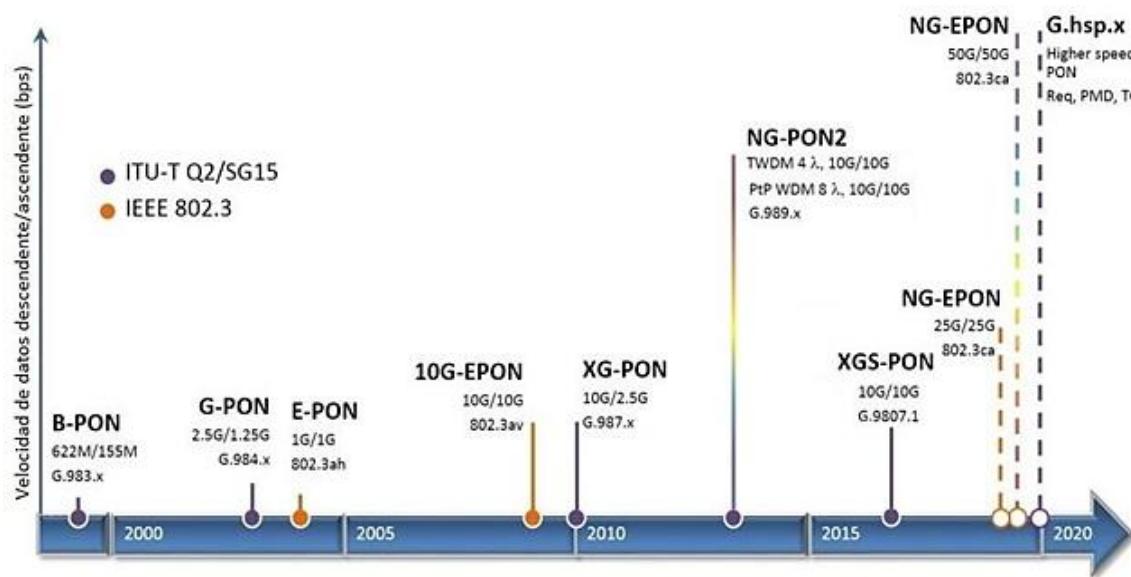


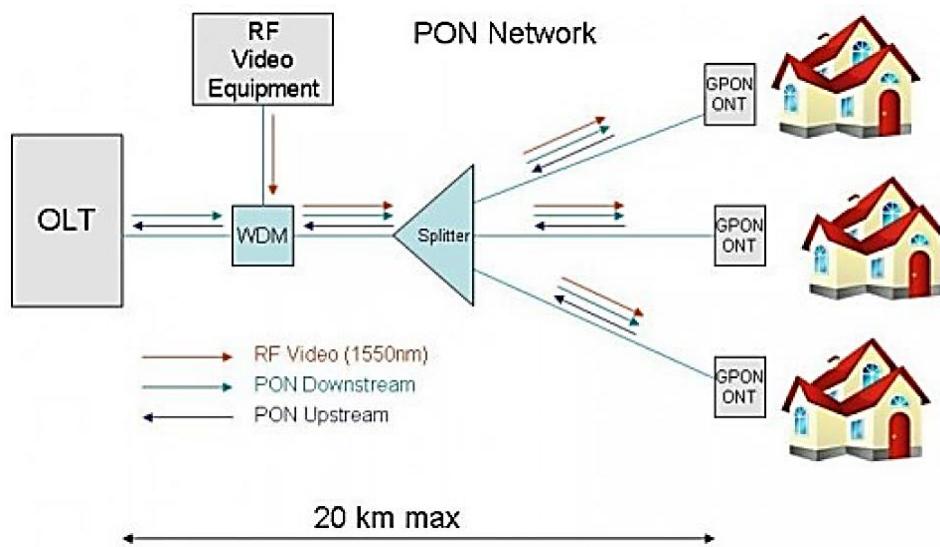
Figura 1.5 – Evolución de las redes ópticas pasivas [13].

#### - GPON

La diversidad de servicios y aplicaciones no se hizo esperar, por tanto la necesidad de un ancho de banda eficiente, muy altas velocidades de datos y mejor gestión de la red en comparación con sus predecesoras; GPON (*Gigabit-capable Passive Optical Networks, Redes Ópticas Pasivas con capacidad de Gigabit*) se presenta en el estándar ITU-T G.984 de 2003, en las versiones G.984.1 a G.984.7 [9], [14]–[18]. En la versión 1 se presentan las características generales para el nivel físico y especificaciones del nivel de convergencia de transmisión; G.984.3 define una red de acceso flexible para brindar servicios de banda ancha operando a velocidades de 2.4 Gbps en el enlace de bajada, y de 1.24 Gbps o 2.48 Gbps en el enlace de subida; G.984.4 define especificaciones para la interfaz de gestión y control en la ONT (*Optical Network Terminal, Terminal de Red Óptica*); G.984.5 precisa nuevos rangos de longitudes de onda para próximos servicios adicionales en las futuras PON, mediante la utilización de WDM; G.984.6 define características generales para los sistemas G-PON que utilizan dispositivos como regeneradores o amplificadores ópticos entre OLT-ONT; finalmente, G.984.7 presenta los requisitos para que los sistemas G-PON operen en distancias lógicas diferenciales de 40 km, brindando beneficios para ofrecer el servicio a zonas de difícil acceso.

De acuerdo con la especificación, el estándar G-PON mantiene la compatibilidad de los estándares ITU-T G.982 & ITU-T G.983.x; mejora la eficiencia en el transporte de servicios y soporta los requerimientos de ancho de banda para los servicios en entornos residenciales y empresariales; la velocidad se define para modo simétrico de 2.4 Gbps para el enlace ascendente como descendente, y en modo asimétrico se define el enlace ascendente de 1.2 Gbps, y 2.4 Gbps en el sentido de línea descendente. También, define un alcance lógico entre ONT/ONU a OLT de 60 km, un alcance físico máximo entre ONT/ONU a OLT de 20 km, y un alcance lógico diferencial de 20 km [9]. Los servicios ofrecidos en este tipo de

estándar dependen de factores legales para la prestación, así como el operador de red y su infraestructura de telecomunicaciones, sin embargo, la primera versión de la recomendación tiene algunos ejemplos de servicios que puede soportar la tecnología, como: servicio de datos Ethernet, servicio de telefonía PSTN básico y primario, servicios de línea privada (T1<sup>1</sup>, E1<sup>2</sup>, DS3<sup>3</sup>, E3<sup>4</sup>), y video digital; también, define un método de encapsulamiento de la información llamado GEM (*GPON Encapsulation Method, Método de Encapsulamiento Ethernet*) que soporta tramas Ethernet, ATM, TDM, entre otras. G-PON ofrece una relación de división atractiva para los operadores de las redes de “1:64”, y con una posterior evolución de los módulos ópticos, esta relación de división será de “1:128” [19]. En la figura 1.6 se presenta la arquitectura básica de G-PON.



*Figura 1.6 – Arquitectura G-PON [11].*

### 1.1.3. Redes de acceso FSAN

La transición de las redes de telecomunicaciones está pasando de las redes basadas en circuitos a redes NGN (*Next Generation Network, Red de Próxima Generación*) basadas en paquetes, este escenario de migración provee de varios servicios en una misma plataforma [20]. Las redes de próxima generación son desarrolladas con el propósito de soportar los servicios tradicionales y los servicios emergentes basados en paquetes, así como todos los servicios y aplicaciones móviles de los usuarios residenciales y empresariales, con una elevada calidad del servicio QoS, eficiencia en el ancho de banda y velocidades de datos del orden de los Gigabits por segundo, siendo los sistemas de telecomunicaciones basados en fibra óptica importantes candidatos a cumplir con los requerimientos de una red NGN. Algunos de los requerimientos para NGN según [20], son: permitir la creación,

<sup>1</sup> **T1**, Estándar de transmisión de datos a una velocidad de 1.544 Mbps.

<sup>2</sup> **E1**, Estándar de transmisión de datos a una velocidad de 2.048 Mbps.

<sup>3</sup> **DS3**, Estándar de transmisión de datos a una velocidad de 44.736 Mbps.

<sup>4</sup> **E3**, Estándar de transmisión de datos a una velocidad de 34.368 Mbps.

introducción y gestión de todos los tipos de servicios; soportar a nivel de transporte servicios con diferentes demandas de ancho de banda; separar los servicios y el transporte de la red permitiendo evolucionar de manera independientemente, entre otros.

Por lo anterior, el grupo de tarea FSAN plantea una evolución en dos etapas: NG-PON1 (*Next-Generation Passive Optical Network, Red Óptica Pasiva de Nueva Generación 1*) que comprende arquitecturas de tipo XG-PON, y XGS-PON, así como, NG-PON2 que propone arquitecturas completamente de nueva generación a 40 Gbps [21]. Por otra parte, el comité europeo FTTH propone varias arquitecturas de red para diferentes escenarios de interconexión y convergencia de tecnologías, con la finalidad de una migración a redes de próxima generación y coexistencia de los diferentes estándares propuestos [8]. En la Figura 1.7 se presentan las múltiples aplicaciones de tipo FTTx.

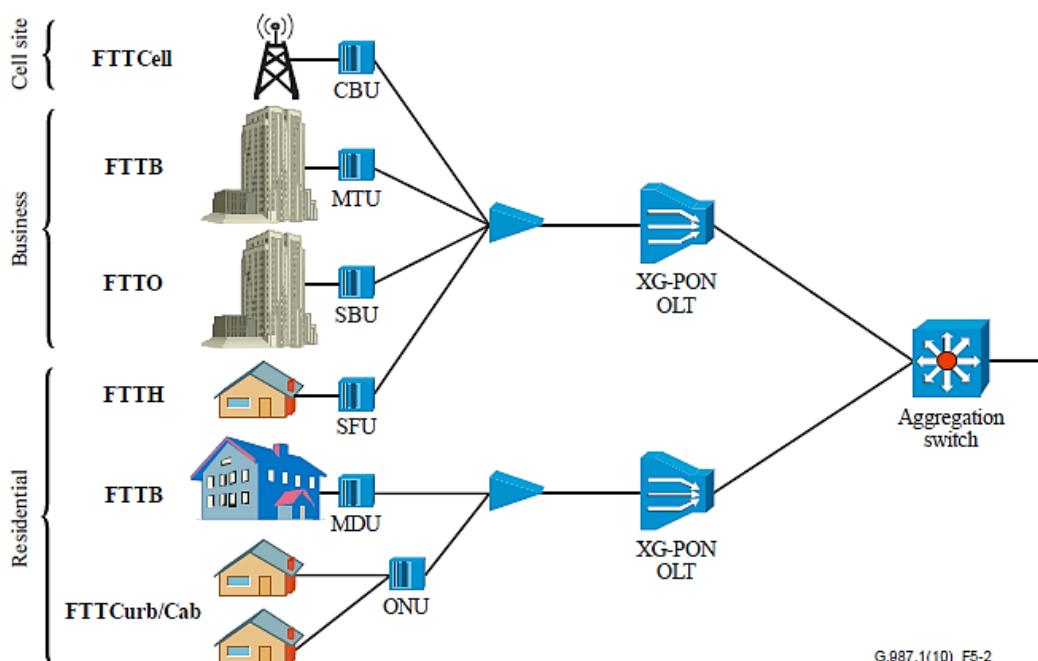


Figura 1.7 – Arquitecturas FTTx para escenarios XG-PON [22].

A continuación, se precisan las características principales de NG-PON1, a fin de soportar conceptualmente uno de los ítems principales sobre la investigación, el cual es la migración de XG-PON a XGS-PON con el propósito de evaluar el desempeño de la técnica de modulación M-QAM dentro de una infraestructura de red convergente OFDM-RoF.

#### - XG-PON

Se encuentra definida dentro del estándar UIT-T G.987 [21] de 2012, en sus versiones G.987.1 a G.987.4 [22]–[25], manteniendo tanto como fuera posible la interoperabilidad con los estándares anteriores y definir la compatibilidad con las

ODN existentes; la recomendación plantea un mecanismo de migración desde las G-PON a XG-PON utilizando la técnica WDM para multiplexar por un hilo de fibra varias longitudes de onda y así obtener eficiencia en el ancho de banda. Las versiones definidas dentro de esta recomendación se basan en los requerimientos generales, las especificaciones del nivel de convergencia de transmisión y, la arquitectura y los parámetros de interfaz para redes XG-PON con un alcance extendido, para G.987.1, G.987.3, G.987.4, respectivamente.

La idea principal de este tipo de tecnología es la de superar las velocidades alcanzadas con la tecnología G-PON, por lo cual, el estándar se desarrolla en un principio simétrico a 2.5 Gbps, tanto para el enlace de subida como de bajada; posteriormente, la recomendación plantea un modo asimétrico para una velocidad en el enlace descendente de 10 Gbps y en el enlace ascendente de 2.5 Gbps; la longitud de onda operativa es la misma que para el estándar IEEE 10G-EPOON y permite la coexistencia con las longitudes de onda definidas para G-PON. Estas son de 1575-1580 nm para el enlace de bajada, y 1260-1280 nm para el enlace de subida [22]. La figura 1.8 presenta el plan espectral de longitudes de onda para la evolución de las redes PON.

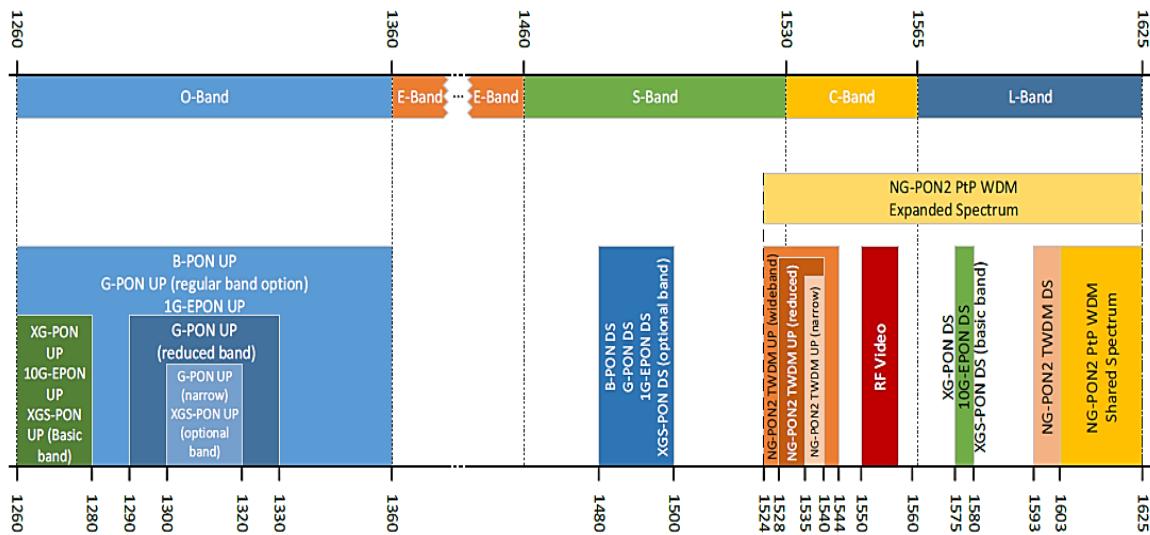
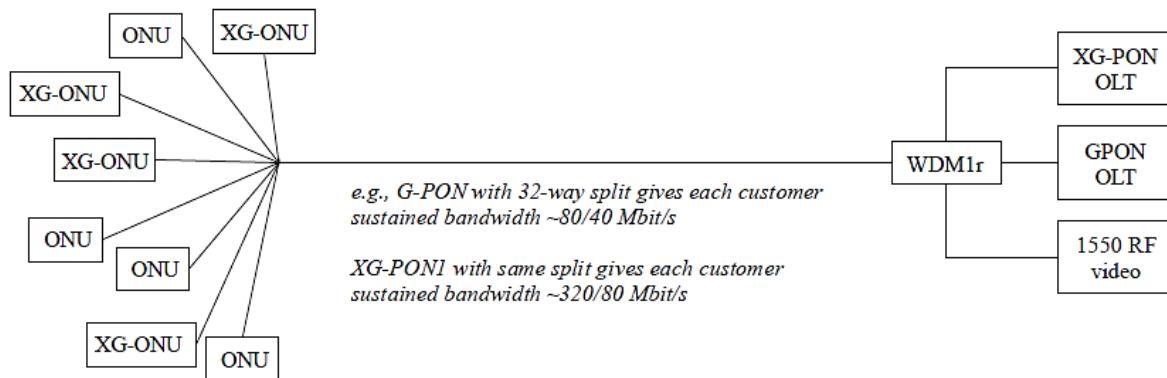


Figura 1.8 – Espectro de frecuencias en los sistemas PON [10].

XG-PON coexiste con G-PON en la misma ODN, disminuyendo el costo de migración de la red para los operadores de servicio en G-PON; en la figura 1.9 se ilustra que dicha compatibilidad se obtiene con un filtro “WDM1r” ubicado en la oficina central, y un filtro WBF (*Wavelength Blocking Filters, Filtro de Bloqueo de Longitud de Onda*), ubicado dentro de una ONU, y permite multiplexar o demultiplexar longitudes de onda en varias señales en sentido ascendente o descendente [22]. Algunas otras características a tener en cuenta dentro del contexto metodológico para la tecnología XG-PON, según [22] son:

- Las ODN existentes hasta el momento permiten relaciones de división de 1:32 y 1:64, sin embargo, el requerimiento mínimo para la relación de división en XG-PON debe ser de 1:64 para un alcance máximo diferencial de al menos 20 km y soportando tramas Ethernet como mínimo de 2000 bytes de longitud.
- La nueva gama de servicios dentro de esta nueva arquitectura de red de siguiente generación definida por el estándar, son: telefonía tradicional, telefonía VoIP, televisión en tiempo real (IPTV y transmisión de TV digital), líneas dedicadas con capacidad T1 y E1, acceso a Internet de muy altas velocidades, servicios VPN, entre otros.
- Utiliza el método de encapsulación XGEM (*XG-PON Encapsulation Method, Método de Encapsulación XG-PON*) dentro de la capa de convergencia de transmisión, permitiendo flujos de tráfico individual, fragmentación y privacidad de datos, para conveniencia en la adaptación de varios tipos de datos.
- Implementa un nuevo concepto como asignación DBA (*Dynamic Bandwidth Allocation, Asignación Dinámica de ancho de Banda*), el cual se basa en la densidad de tráfico que demanda la ONU, para que la OLT distribuya dinámicamente la capacidad de ancho de banda.



*Figura 1.9 – Coexistencia de G-PON y XG-PON con opción de vídeo RF [22].*

#### - XGS-PON

La última actualización del estándar XG-PON, llamado XGS-PON dentro de las recomendaciones ITU G.9807.1 [26] de 2016 y G.9807.2 [27] de 2017, se define en redes de acceso óptico para aplicaciones y servicios en entorno residencial, empresarial, red troncal móvil, entre otras; caracterizada por una topología P2MP a una velocidad de datos simétrica de 10 Gbps, así mismo, se garantiza la interoperabilidad con los estándares anteriores y el estándar NG-PON2. Las principales actualizaciones presentan la adición de FTTPd, una relación de división

mínima de 1:64 con escalabilidad a 1:128 y 1:256, define la técnica TDMA para el sentido hacia el origen y utiliza métodos de superposición de longitud de onda; también, presenta dos opciones de longitud de onda operativa (ver figura 1.8), las cuales son: longitud de onda operativa básica (*misma que XG-PON y 10GE-PON*), y longitud de onda operativa opcional (*misma que B-PON, G-PON y 1GE-PON*) [26].

En términos de servicios, XGS-PON debe soportar los servicios alcanzados en anteriores estándares y múltiples servicios emergentes en concordancia con redes de próxima generación NGN, tales como servicios IP, servicios VPN de alto nivel, acceso a Internet con capacidades de Gibabit Ethernet, y backhaul móvil, entre otros. Por su parte, el grupo de tarea FSAN dicta soluciones entorno a las redes PON, con el propósito de una migración completa a redes de tipo FTTx, manteniendo los ambientes de red, las arquitecturas, las topologías, el acceso y los estándares, para la siguiente generación de sistemas de tipo AON. La tabla 1.1 presenta los requerimientos necesarios de redes XGS-PON, basados en los estándares sugeridos por la ITU.

CARACTERÍSTICAS	REQUERIMIENTO	
Servicios a nivel de acceso	PDH	SDH
	T1 y E1	STM-64
Mínima trama de empaquetamiento	Tipo Ethernet de 2000 bytes y hasta 9000 bytes	
Características de la fibra	Definidas en el estándar UIT-T G.652	
Distancias del enlace	Definidos para distancias entre los 40 km y los 60 km	
Asignación dinámica de ancho de banda	Reporte de estado SR-DBA y monitoreo de tráfico TM-DBA	
Aplicaciones	FTTx	
Velocidad nominal	10 Gbps simétricos	
Métodos de coexistencia	Sobre carga de longitud de onda y/o TDMA	

Tabla 1.1 – Características generales de redes tipo XGS-PON [28].

La segunda etapa de evolución denominada NG-PON2, se empieza a desarrollar en 2015 con una capacidad teórica de 40 Gbps, utilizando 4 canales de longitud de onda con velocidades nominales de 10 Gbps en el sentido de línea descendente y de 2.5 Gbps en el sentido de línea ascendente, y en un futuro será posible combinar hasta 8 longitudes de onda para lograr 80 Gbps [29]. Su release para esta nueva generación de redes PON de servicio completo, se relacionan con los estándares ITU-T G.989.1 a ITU-T G.989.3 [30]–[32]. En la tabla 1.2 se presentan las características generales para redes NG-PON2.

CARACTERÍSTICAS		REQUERIMIENTO	
Arquitectura		Tipo WDM y TDM mediante mecanismos de acceso	
Canales		4 canales TWDM	
Tasa nominal por canal		10 Gbps	
Máxima distancia alcanzable		Entre 20 km y 40 km	
Servicios a nivel de acceso	PDH	SDH	
	T1 y E1	STM-64	

Tabla 1.2 – Características generales para redes NG-PON2 [28].

Según [26], en un contexto de migración los sistemas XG-PON y XGS-PON pueden coexistir utilizando TDMA, permitiendo así, el alojamiento simultáneo de las ONUs de las dos tecnologías en un puerto OLT XGS-PON. Así mismo, operar en la misma ODN de XG-PON, así como en las longitudes de onda operativa básica. Por lo anterior, solo es necesario la implementación de una tarjeta de interfaz XGS-PON en la OLT para una eventual migración. En la tabla 1.3 se presenta un resumen de las características para las tecnologías PON.

PARÁMETRO	BPON	GPON	EPON	XG-PON	XGS-PON	NG-PON2
Estándar	ITU-T G.983.x	ITU-T G.984.x	IEEE 802.3ah	ITU-T G.987.x	ITU-T G.9807.x	ITU-T G.989.x
Publicación	2001	2003	2004	2010	2016	2015
Tasa de bits (Mbps)	Up: 1244, 2488. Down: 155, 622, 1244, 2488	Up: 1250 Down:1250	Up: 2.5 Gbps Down: 10 Gbps	Up: 10 Gbps Down: 10 Gbps	Up: 4 canales TWDM/ 2.5 Gbps Down:4 canales TWDM/10 Gbps	OLT-ONU: 1575-1580 nm ONU-OLT: 1260-1280 nm
Codificación línea	NRZ	NRZ	8B/10B	NRZ	NRZ	NRZ
División máxima	1:32	1:64	1:32	1:128	1:128	1:256
Alcance máximo	20 Km	20 Km	20 Km	20 Km	20 Km	20 Km
Tecnología acceso	TDMA	TDMA	CSMA/CD	TDMA	TDMA	TDMA
Tipo trama	ATM	GEM	Ethernet	XGEM	XGEM	XGEM
Lamda operativa Básica.	Up: 155, 622. Down: 155, 622, 1244.	OLT-ONU: 1480-1500 nm ONU-OLT: 1260-1360 nm	OLT-ONU: 1480-1500 nm ONU-OLT: 1260-1360 nm	OLT-ONU: 1480-1500 nm ONU-OLT: 1260-1360 nm	OLT-ONU: 1575-1580 nm ONU-OLT: 1260-1280 nm	OLT-ONU: ONU-OLT: 1260-1280 nm

Tabla 1.3 – Análisis comparativo de tecnologías PON.

## 1.2. REDES CONVERGENTES

Desde hace varios años se utiliza el término convergencia de redes, refiriéndose al hecho de unificar los sistemas que permiten el tráfico de video, voz y datos, es decir, brindar diferentes servicios de telecomunicaciones en una misma infraestructura de red. La llegada de nuevas tecnologías, la creciente demanda de conectividad y transmisión de información, ha derivado en una constante convergencia de las redes actuales, en rediseñar el despliegue de las mismas, sumado a eso, hoy en día la convergencia busca mejorar las condiciones de accesibilidad, ancho de banda y conseguir altos niveles de QoS [33].

### 1.2.1. Radio over Fiber (RoF)

Los sistemas de comunicación por fibra óptica se han instaurado hace ya varias décadas, permitiendo conexiones transoceánicas, de larga distancia y en redes regionales y metropolitanas. En la actualidad, la demanda de ancho de banda, el despliegue de servicios como VoIP, HDTV (*High Definition Television, Televisión de Alta Definición*), entre otros, han impulsado el uso de la fibra óptica hasta el usuario final, esto significa un aumento en el tendido de fibra FTTB, perfilando esta tecnología como una gran opción para el segmento de red fijo [3]. Simultáneamente, los sistemas de comunicación inalámbricos se han convertido en un pilar indispensable para las conexiones y el acceso directo a los servicios tales como telefonía móvil, Internet inalámbrico, sistemas inalámbricos fijos y móviles, entre otros.

La evolución de las comunicaciones inalámbricas tiene una implicación directa con el aumento exponencial del tráfico de datos que los canales de transmisión inalámbricos necesitan transportar con una latencia cada vez más pequeña. Esto se debe a que los dispositivos inalámbricos inteligentes, como teléfonos, computadoras portátiles y tabletas, están equipados con varias aplicaciones multimedia intensivas en datos, como video vigilancia inalámbrica, TV móvil, transmisión en vivo de video HD (*High Definition, Alta Definición*), juegos en línea, redes sociales y almacenamiento en la nube. Estudios recientes predicen que habrá un aumento de varios cientos de veces en el volumen de tráfico de datos en los próximos años, junto con un amplio crecimiento de la cantidad de dispositivos conectados [34]. El factor clave para el éxito de las redes de próxima generación será alcanzar la capacidad para soportar un crecimiento tan exponencial del tráfico de datos con diversos requisitos de QoS [35].

Para suplir los requisitos de ancho de banda y alta demanda de conectividad de los usuarios, se ha llevado al límite la capacidad de las redes inalámbricas existentes y sin embargo parecen quedarse cortas, pero tampoco los sistemas de comunicación ópticos pese a su gran ancho de banda permiten el acceso y movilidad que se requiere para las redes actuales, ante esto, se presenta como una gran solución realizar la unificación de redes ópticas e inalámbricas que

combinadas, permiten una mejora en la prestación de los servicios, optimización de recursos, mayor número de usuarios, gran despliegue y un costo accesible [36].

#### - Definición

El concepto de RoF expresa que se realiza la transmisión de información mediante la fibra óptica, usando como mecanismo el ajuste del modulador de la señal óptica con la señal de RF (*Radio Frequency, Radio Frecuencia*) que se desea emitir. RoF es una combinación de redes inalámbricas con redes de fibra óptica, donde las señales de RF se distribuyen desde una ubicación central CO (*Central Office, Oficina Central*) a través de un enlace de fibra óptica hasta una estación base BS (*Base Station, Estación Base*), éstas BS transmiten datos a estaciones o terminales móviles que se encuentran dentro del alcance, por lo tanto, una sistema RoF consta de cuatro elementos principales: el transmisor óptico, la red de acceso óptica, las BS y el usuario final móvil o fijo [37]. Los sistemas RoF permiten aprovechar la baja atenuación y el alto ancho de banda de un enlace óptico con la transmisión de señales de radiofrecuencia, microondas u ondas milimétricas, pero existen diferentes consideraciones, ventajas y desventajas al emplear determinado tamaño de longitud de onda, sin embargo, a nivel general representan una posible solución para aumentar la capacidad, la movilidad y reducir los costos en la red de acceso [4]. En la figura 1.10 se muestra la arquitectura general de un sistema RoF.

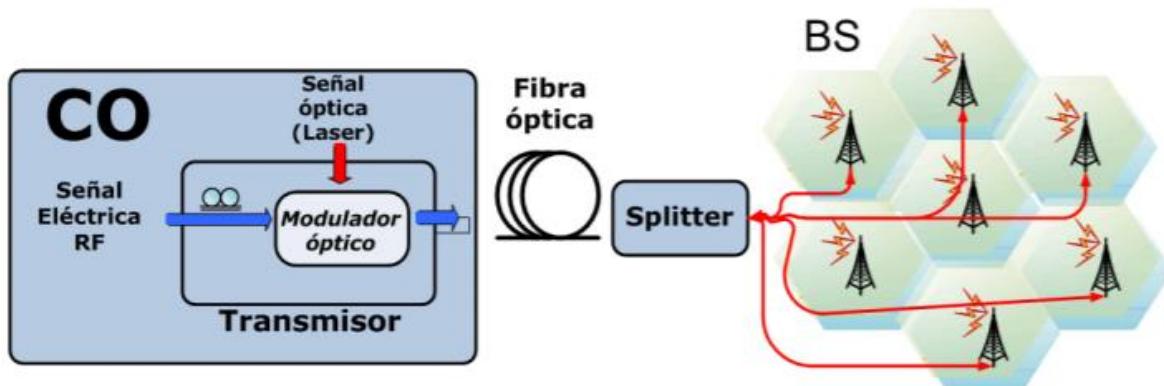


Figura 1.10 – Arquitectura general RoF [1].

Cuando existen diferentes BS, la señal es dividida a cada una a través de un dispositivo pasivo (*splitter*) como se ve en la figura 1.10, y se transmite a los usuarios finales después de ser distribuida a través del sistema RoF como se ve en la figura 1.11. Desde los primeros experimentos de transmisión y distribución de señales de radio sobre fibra óptica, la convergencia de redes ópticas e inalámbricas ha evolucionado, se han utilizado en diversidad de redes inalámbricas como redes celulares exteriores y antenas distribuidas en interiores [38]. De esta manera los sistemas RoF enfrentan retos para soportar múltiples estándares, respaldar de manera confiable y rentable las demandas de capacidad, el crecimiento del tráfico y los servicios en las redes actuales y futuras [36]. Recientemente se está explorando la región de frecuencias que permita extender la cobertura inalámbrica

de los sistemas de radiocomunicaciones para la prestación de servicios de banda ancha, el gran interés se ha centrado en las ondas milimétricas MMW (*Millimeter-Wave, Onda Milimétrica*), especialmente en la banda de 60 GHz sin licencia y disponible a nivel mundial, pues los estándares inalámbricos existentes como LTE (*Long Term Evolution, Evolución a Largo Plazo*), UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System, Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles*), GSM, IEEE 802.11x, trabajan en rangos de baja frecuencia desde los 700 MHz hasta 6 GHz [39].

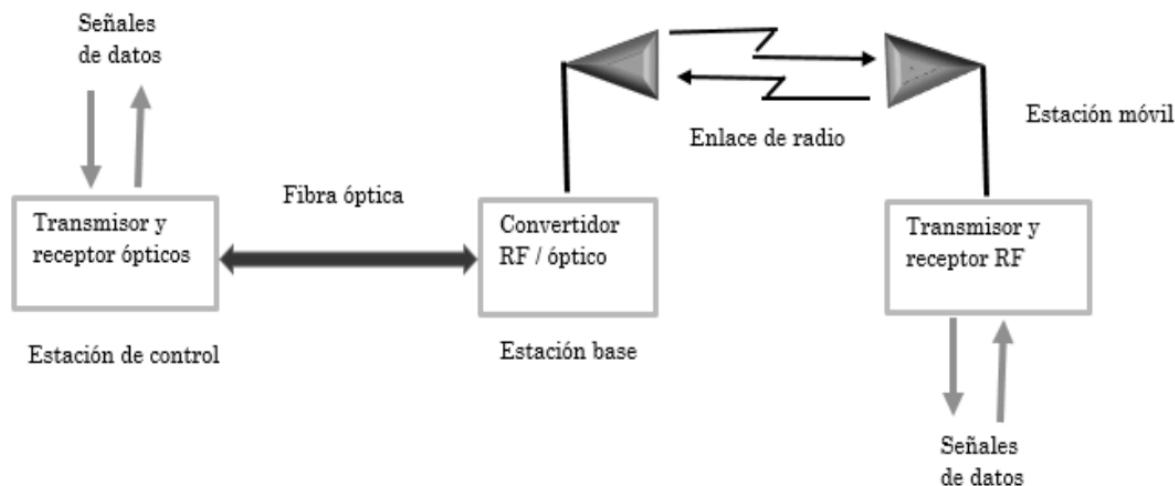


Figura 1.11 – Diagrama de comunicaciones RoF [40].

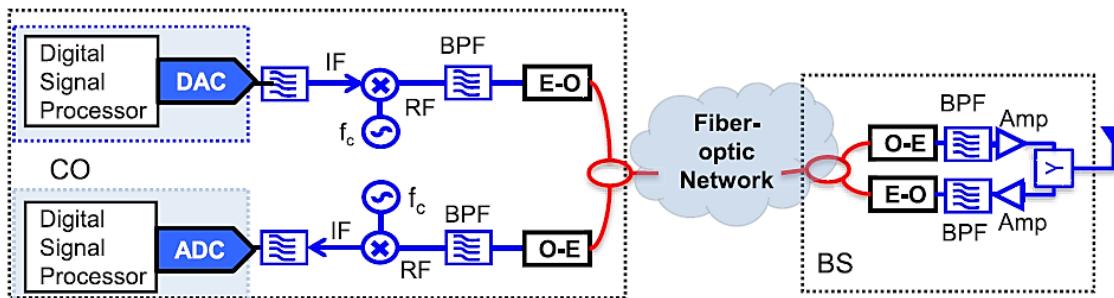
La región de frecuencia de MMW (60 GHz) ofrece a los operadores inalámbricos alcanzar velocidades de datos de varios Gbps, lo cual puede compensar las demandas crecientes de capacidad. Sin embargo, los sistemas inalámbricos presentan inherentemente características de pérdidas y atenuaciones por propagación que se hacen más notorios a frecuencias altas y limitan la distancia de cobertura, lo que conduce a arquitecturas de red que presenten tamaños de celdas más pequeñas, como picoceldas. Integrando estos sistemas con una red de distribución de fibra óptica, se consigue la entrega eficiente de las señales inalámbricas de alta velocidad de datos a un gran número de puntos de acceso y se optimiza la cobertura de radio [41].

La señales de RoF pueden ser transportadas a través de enlaces bien sea analógicos o digitales, cada técnica tiene sus ventajas y desventajas [39]. A continuación, se muestran los dos enfoques para implementar un enlace remoto con fibra óptica y antenas que permitan la transmisión de señales RF en una arquitectura de red convergente óptica e inalámbrica.

#### - Esquema de transporte analógico

Como se observa en la figura 1.12, los enlaces de fibra óptica entre una CO y la unidad de antena o BS ubicada remotamente se realizan como enlaces de fibra óptica analógicos. En el enlace descendente (de CO a BS), la señal se convierte a

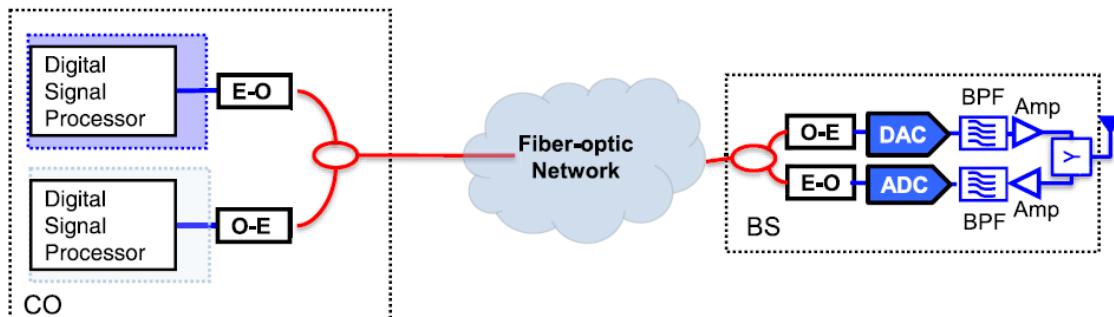
través de un conversor DAC (*Digital to Analog Converter, Convertidor de Digital a Analógico*), luego se modulan en una señal portadora de RF con una frecuencia “ $f_c$ ” que corresponde a la frecuencia inalámbrica, en seguida es modulada en una portadora óptica a través de un proceso de conversión de eléctrico a óptico; en la antena remota BS, la señal óptica modulada se fotodetecta, es decir, se convierte de óptica a eléctrica, se filtra a través de un filtro pasa banda BPF (*Band-Pass Filter, Filtro Pasa Banda*), se amplifica y se dirige a la antena para la transmisión inalámbrica. Para el enlace ascendente se lleva un proceso similar pero inverso, con la red inalámbrica que transporta la señal desde la BS hacia la CO [39].



*Figura 1.12 – Transporte de señal RoF entre CO y BS, enlace analógico [39].*

#### - Esquema de transporte digital

En esta configuración de enlace de fibra óptica de RF digitalizada, para el enlace ascendente (de BS a CO) el primer paso es digitalizar la señal del usuario inalámbrico en la BS antes del transporte a través del enlace óptico, esta digitalización de la señal RF genera una señal muestreada en forma de serie que puede ser modulada directamente por un láser semiconducto, transmitirse a través del enlace de fibra óptica y posteriormente detectarse como cualquier otra información digital. Según [42], estudios desarrollados avalan los sistemas RoF como la vía más rentable para conseguir una mayor integración de la red y simplificar las estaciones inalámbricas, todo esto gracias a los desarrollos de muestreo electrónicos y procesamiento de señales. En la figura 1.13 se ilustran los componentes del esquema.

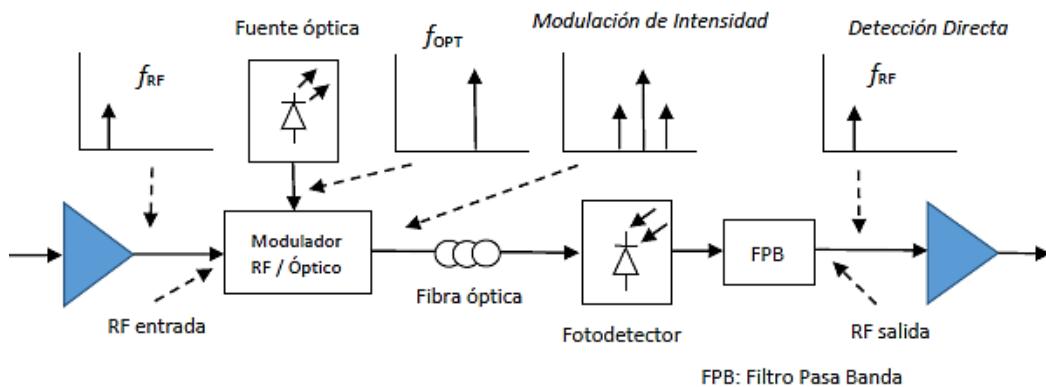


*Figura 1.13 – Transporte de señal RoF entre CO y BS, enlace digital [42].*

Por otra parte, para la transmisión de las señales RoF existen diferentes principios a través de los cuales se genera la señal RF adecuada al canal óptico, como la modulación y, la multiplexación para su posterior detección y recepción. En la modulación, la señal eléctrica se modula en frecuencia, amplitud o fase de acuerdo a las especificaciones requeridas por el estándar de red inalámbrico con el que se esté trabajando. Esta señal modula a la portadora óptica que se transmite a través de la fibra óptica, dicha alteración de las señales se da gracias a un diodo láser que modula la intensidad de la luz de acuerdo con la señal eléctrica [43]. Existen diferentes tecnologías de modulación óptica, sin embargo sobresalen dos grandes grupos como lo son la modulación directa y la modulación externa, en seguida se describen algunas:

#### - Modulación directa

La señal de información altera la corriente de conducción del láser directamente y genera una modulación de intensidad IM (*Intensity Modulation, Modulación por Intensidad*) en la fuente óptica, de forma similar se logra la demodulación, mediante la detección directa DD (*Direct Detection, Detección Directa*) como se aprecia en la figura 1.14 [43].



*Figura 1.14 – Modulación IM/DD [36].*

#### - Modulación externa

Se usa para la modulación en frecuencias más altas a los 10 GHz, donde la modulación directa presenta limitaciones. En este caso, se tiene un dispositivo óptico externo al que se le hace llegar la señal moduladora, a través de este dispositivo se hace pasar la señal óptica con una intensidad constante en el tiempo generada por el láser, como resultado a la salida se tiene la radiación modulada y adecuada al canal [36]. Se tienen dos tipos de moduladores más usados, como lo son el electro óptico MZM (*Mach-Zehnder Modulator, Modulador Mach-Zehnder*) y el de electro absorción EAM (*Electro-Absorption Modulator, Modulador de Electro-Absorción*).

- **MZM:** en estos, se genera un cambio en el índice de refracción del material originado por una señal eléctrica. Un cristal electro-óptico orientado correctamente puede modular la fase y la intensidad de la señal óptica si se aplica una tensión en la dirección correcta. En los MZM se modula variando la fase de la señal óptica que circula por dos guías de onda [43].
  - **EAM:** se basan en la absorción de la luz cuando ésta pasa a través de un semiconductor y éste se encuentra bajo los efectos de un campo eléctrico. De acuerdo a una tensión determinada se hace comutar el modulador de un estado “on” a “off” [44].
- **Heterodinación óptica**

En este método la fuente de luz genera varias señales ópticas, una de éstas es modulada por la señal que porta la información, en seguida son mezcladas o heterodinadas por un fotodetector o por un mezclador externo para formar la señal RF de salida [44].

- **Comparación hacia arriba y hacia abajo**

En esta técnica, no se transporta la señal de banda RF a través de fibra óptica, en su lugar se envía la señal de banda IF (*Intermediate Frequency, Frecuencia Intermedia*) ya que esta señal óptica de banda IF presenta muy pocos efectos de dispersión [67].

- **Transceptor óptico**

Es posible implementar la estructura de una BS de manera sencilla con un transceptor como el EAM, y sirven como un conversor óptico-eléctrico en el enlace descendente y conversor eléctrico-óptico para el ascendente al mismo tiempo. Esto se logra transmitiendo dos longitudes de onda desde la CO hacia la BS, una va modulada con los datos enviados en el enlace descendente, mientras que la no modulada viaja y se modula en la BS con los datos de enlace ascendente y retoma a la CO, es decir, el transceptor actúa como fotodiodo para la ruta de datos y también como modulador ofreciendo una ruta de retorno para los datos, de esta manera se evita instalar un láser en el sitio remoto [36].

Los sistemas RoF, comparados con la distribución de señales eléctricas o electromagnéticas comúnmente usadas, ofrecen los siguientes beneficios:

- **Eficiente ancho de banda**

La fibra óptica presenta 3 ventanas de transmisión principales, entre las cuales ofrecen un ancho de banda enorme que excede los 50 THz, además, en dichas ventanas 850 nm, 1310 nm y 1550 nm, la atenuación es mínima. Aunque los

sistemas actuales solo explotan una fracción de la capacidad, menos de 2 THz, continúan los desarrollos para mejorar la explotación de la fibra óptica. Para conseguir utilizar más el ancho de banda, se debe mejorar en factores como la disponibilidad de baja dispersión de la fibra, amplificadores EDFA (*Erbium Dopa Fiber Amplifiers, Amplificadores de fibra de Erbium Dopa*) y el uso de técnicas avanzadas de multiplexación. Sumado al gran ancho de banda que permite la transmisión de señales MMW por fibra óptica, otro beneficio es el procesamiento de señales que ofrece el ancho de banda óptico. Realizar funciones como el filtrado, mezclado y conversión de señales microondas puede implementarse en el dominio óptico, relativamente fácil comparado en sistemas electrónicos [45]. El ancho de banda de los sistemas electrónicos que constituyen las fuentes y receptores de la transmisión de datos, obstaculizan considerablemente el uso del gran ancho de banda de la fibra óptica. Esta problemática se conoce como cuello de botella electrónico, la mejor forma de solucionarlo es realizar una multiplexación efectiva.

**- Bajas perdidas por atenuación**

La transmisión de señales de alta frecuencia resulta complicada y bastante costosa, ya sea en el espacio libre o mediante líneas de transmisión, pues en el espacio libre las perdidas por absorción y reflexión aumentan con la frecuencia, de igual manera la impedancia en las líneas de transmisión se incrementa con la frecuencia, generando así, unas perdidas elevadas. Ante esto, realizar la distribución eléctrica de señales de alta frecuencia a largas distancias requiere de un equipo costoso para su regeneración [46]. Por su parte, distribuir MMW mediante líneas de transmisión no es viable, incluso para distancias cortas; como solución a este problema se propone asignar señales de banda base o señales de baja frecuencia IF desde la CO hasta la BS, dichas señales se convierten a la frecuencia de microondas requerida en cada BS, se amplifican y se transmiten. Este proceso requiere de osciladores de alto rendimiento para la conversión de señales en la BS, haciéndola más compleja y con funciones reducidas, es aquí donde la fibra óptica tiene gran impacto, pues permite la distribución de ondas MMW a bajas perdidas y la simplificación de las BS, sumado a esto, se incrementan las distancias de transmisión y se reducen las potencias requeridas considerablemente; por su parte, si se compara la distribución de señales de forma óptica respecto a otro medio como por ejemplo, cable coaxial, el alcance en las distancias de transmisión se incrementa considerablemente al tiempo que se reduce la potencia de transmisión, pues al considerar fibras monomodo en las ventanas de 1550 nm y 1310 nm, se presentan perdidas por atenuación menores a 0.2 dB/km y 0.5 dB/km, respectivamente [47].

**- Fácil instalación y mantenimiento**

La complejidad de los equipos y mayor costo en los sistemas RoF, se encuentra en la estación principal CO, de este modo, las BS son más simples. Entre las técnicas RoF que se requieren, la modulación y commutación se hace con equipos ubicados en la CO, la BS normalmente está formada por un fotodetector, amplificador, y antena. Esta disposición conduce a BS más pequeñas y livianas

reduciendo los costos de instalación y mantenimiento del sistema, que son requisitos para la implementación del gran número de BS necesarias en los sistemas de MMW, a su vez, la simplicidad de estas estaciones reduce el impacto ambiental [46].

- **Inmunidad a la interferencia de radiofrecuencia**

Esta es una característica muy interesante de la fibra óptica, debido a que las señales se transmiten en forma de luz, la información viaja inmune a la interferencia electromagnética. Esta propiedad proporciona privacidad y seguridad, haciendo a los sistemas de fibra óptica preferibles para las conexiones con MMW, incluso a distancias cortas [46].

- **Consumo de energía reducido**

El uso de BS simplificadas reduce notablemente el consumo de energía. En la CO se encuentra la mayor parte de equipo complejo y para algunas aplicaciones, la BS funcionan en modo pasivo, lo cual hace más significativa la reducción del consumo energético teniendo en cuenta la ubicación remota de antenas que no son alimentadas por la red eléctrica [46].

- **Operación flexible del sistema**

Dependiendo de la técnica de generación de MMW, se puede hacer transmisión transparente en formato de señales en el sistema RoF. Por ejemplo, la misma red RoF puede ser utilizada para distribuir el tráfico de múltiples operadores y múltiples servicios, dando como resultado grandes ahorros económicos; una manera de lograrlo es combinando de técnicas de multiplexación como OFDM con WDM o SCM (*Sub-Carrier Multiplexing, Multiplexación por Sub-Portadora*), que presenta una alta tolerancia a la dispersión cromática [45].

- **Asignación dinámica de recursos**

A partir de la estación centralizada CO, es posible asignar capacidad dinámicamente. Mediante las funciones de RF que se realizan en la CO, como la conmutación, modulación, etc., es posible asignar mayor o menor capacidad en determinadas áreas, en determinada hora; donde la mayor cantidad de usuarios se conectan a la red. Esto se logra mediante la asignación de longitudes de onda óptica a través de WDM según se requiera, consiguiendo así, no desperdiciar los recursos, mejorar la capacidad y movilidad de la red RoF.

- **Funcionalidades del sistema de radio**

Algunas de las funcionalidades del sistema radio se complican a altas frecuencias, la tecnología RoF permite realizar muchas funciones, entre las cuales se incluyen el filtrado, control de atenuación, y procesamiento de señal en sistemas

de antenas. Dichas funciones se conocen como funciones de MMW, y son difíciles de lograr en el dominio eléctrico debido a limitaciones de ancho de banda y de propagación de las ondas, no obstante, si el proceso se realiza en el dominio óptico, estará disponible un ancho de banda de procesamiento de señal ilimitado, con lo cual estas funciones se pueden efectuar y en ocasiones sin necesidad de realizar la conversión de señal de eléctrica a óptica [45].

#### - Ondas milimétricas

Eléctricamente no es viable distribuir señales de MMW, pues las altas perdidas de propagación de RF y lo difícil que resulta generarlas a través de estos dispositivos hacen que sea prácticamente imposible. Los beneficios de las MMW se obtienen utilizando la fibra óptica, el gran ancho de banda y las bajas perdidas de atenuación hace que la distribución de estas señales sea rentable. Sumado a esto, técnicas avanzadas en medios ópticos son capaces de generar frecuencias ilimitadas [47].

La capacidad, flexibilidad y accesibilidad de los sistemas RoF, permiten la interconexión y operatividad de diversas redes, incrementando la prestación de servicios en diferentes entornos, la figura 1.15 muestra cómo se pueden relacionar redes con gran ancho de banda y en tiempo real. Algunas de las aplicaciones de la tecnología RoF incluyen comunicaciones satelitales, comunicaciones de radio móvil, radio de acceso de banda ancha, servicios de distribución de video multipunto, sistema de banda ancha móvil, comunicaciones y control de vehículos, LAN inalámbricas a través de redes ópticas, etc.

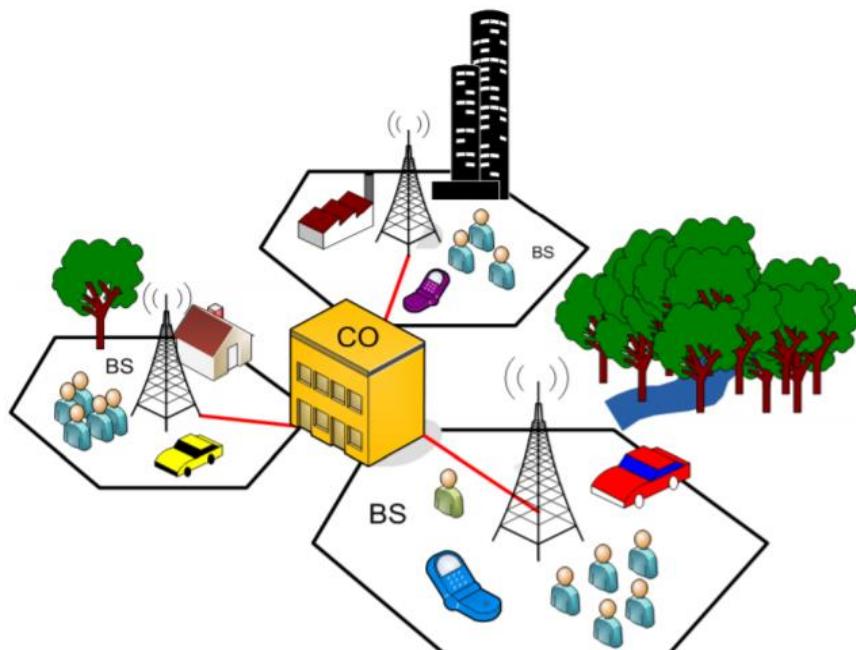


Figura 1.15 – Red de acceso heterogénea de próxima generación RoF [48].

## **1.3. ESQUEMAS DE MODULACIÓN DIGITAL MULTINIVEL**

Los sistemas de comunicación digital envían la información de un transmisor a un receptor utilizando un medio de comunicación, con la ventaja de manejar grandes volúmenes de información e incrementar significativamente la velocidad de datos, para ello, la señal digital es transmitida de dos formas distintas: una trasmisión en banda base donde la señal va directamente por el canal sin una modulación previa, y una transmisión digital en banda ancha donde la señal de información digital se modula previamente con alguna técnica de modulación digital [49]. Según [50], existen beneficios por los cuales las técnicas de modulación digital son implementadas en los sistemas de comunicaciones, además de ser los primeros candidatos a implementarse en tecnologías de próxima generación, algunas de las ventajas, son: alta velocidad de datos, sin una complejidad significativa de los equipos; alta inmunidad al ruido; alta seguridad en la información; alta eficiencia espectral y mejor utilización del ancho de banda; menor BER (*Bit Error Rate, Tasa de Error de Bit*) para relaciones señal a ruido bajas; facilidad de multicanalización de varios tipos de información, como: voz, video y datos.

Con el avance tecnológico, aparecen distintas técnicas de modulación digital de alto nivel en donde la señal analógica de salida varía su amplitud, frecuencia y fase, o conjuntamente amplitud y fase, de acuerdo con una señal digital de información en la entrada; el esquema de multiplexación OFDM utiliza los esquemas de modulación M-PSK (*M-ary Phase-Shift Keying, Modulación de Desplazamiento de Fase M-aria*) y M-QAM, ya que permiten alta eficiencia espectral y mejor utilización del ancho de banda; sin embargo, dependiendo de la exigencia de la aplicación en particular, existen tanto beneficios como dificultades, así, los esquemas de modulación multinivel disminuyen el ancho de banda necesario pero incrementan el nivel de potencia requerida [51]. Por lo anterior, es pertinente para la investigación una revisión teórica que empalma los tipos de modulación digital empleados en comunicaciones ópticas, ya que permiten el transporte de información a altas velocidades en un canal con restricciones de ancho de banda fija.

### **1.3.1. M-PSK**

Es un esquema de modulación angular que se caracteriza por variar la fase de la onda portadora entre un número “M” de valores discretos posibles, dependiendo de un número de estados limitados que presenta la señal moduladora; este esquema es de uso común en los módems y permite mejor aprovechamiento del ancho de banda con respecto a predecesoras como ASK (*Amplitude Shift Keying, Modulación de Desplazamiento de Amplitud*) y FSK (*Frequency Shift Keying, Modulación de Desplazamiento de Fase*) [52]. La ecuación 1.1 representa la expresión analítica general para PSK.

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos[\omega_o t + \phi_i(t)] \quad \text{Ecuación (1.1)}$$

Dónde:

*E: Energía de símbolo.*

*T: Duración del símbolo [Seg].*

*$\phi_i(t)$ : Termino de fase, para todo  $i = 1, 2, \dots, M$ .*

Por su parte, la ecuación 1.2 representa la eficiencia espectral para la modulación M-PSK.

$$\frac{T_b}{B} = \log_2 M \quad \text{Ecuación (1.2)}$$

Dónde:

*Tb: Tasa de bit [bit/seg].*

*B: Ancho de banda del canal [Hz].*

*M: Nivel de modulación.*

El diagrama de constelación y el diagrama fasorial para el sistema M-PSK con M igual a 8, es mostrado en la figura 1.16.

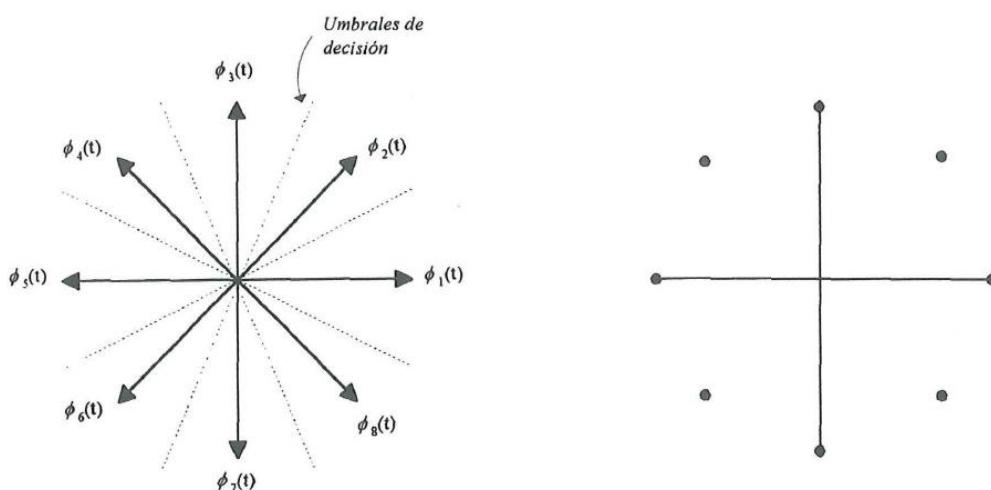


Figura 1.16 – Diagrama fasorial y diagrama constelación M-PSK [50].

La primera variante de esta tecnología es BPSK (*Binary Phase Shift Keying, Modulación de Desplazamiento de Amplitud Binaria*), la cual es utilizada para aplicaciones que no requieran altas velocidades de transmisión y de bajo costo; BPSK tiene 2 niveles de 0 y 1 lógico a la entrada, por lo que a la salida se tienen dos posibles fases de 0 y  $\pi$ , disponibles en el caso de un cambio en la señal de entrada, es decir, cuando la señal moduladora digital cambia de estado, la fase de la portadora de salida varía entre dos ángulos que están  $180^\circ$  desfasados entre sí.

Si se tiene el sistema de modulación 8-PSK ( $M=8$ ), las formas de onda para cada estado con codificación Gray, se muestran en la tabla 1.4.

ESTADOS	FORMA DE ONDA 8-PSK
<b>000</b>	$A * \cos[\omega_0 t + 5\pi/4]$
<b>001</b>	$A * \cos[\omega_0 t + \pi]$
<b>010</b>	$A * \cos[\omega_0 t + \pi/2]$
<b>011</b>	$A * \cos[\omega_0 t + 3\pi/4]$
<b>100</b>	$A * \cos[\omega_0 t + 3\pi/2]$
<b>101</b>	$A * \cos[\omega_0 t + 7\pi/4]$
<b>110</b>	$A * \cos[\omega_0 t + \pi/4]$
<b>111</b>	$A * \cos[\omega_0 t]$

Tabla 1.4 – Cambios de fase en 8-PSK.

### 1.3.2. M-QAM

Llamada también APK (*Amplitude-phase Keying, Modulación de Amplitud-Fase*), define que la señal de información está contenida tanto en amplitud como en la fase de la portadora, diferenciándose de los sistemas M-PSK en donde los puntos dentro de la constelación se encuentran sobre una circunferencia de amplitud fija [49]. La técnica transmite dos mensajes independientes a partir de una misma portadora, los mensajes ocupan la misma banda de frecuencia pero se encuentran desfasados 90° grados entre sí; cada mensaje es modulado independientemente y transmitido por un único camino sobre la misma banda de frecuencia, posteriormente, separado por demodulación en el receptor. Por lo anterior, la señal QAM resultante es la suma lineal de dos señales independientes, que han sido moduladas en DSB-SC (*Double-SideBand Suppressed-Carrier transmission, Transmisión de Portadora Suprimida de Doble Banda Lateral*) [53]. La figura 1.17 representa el diagrama en bloques para un sistema QAM.

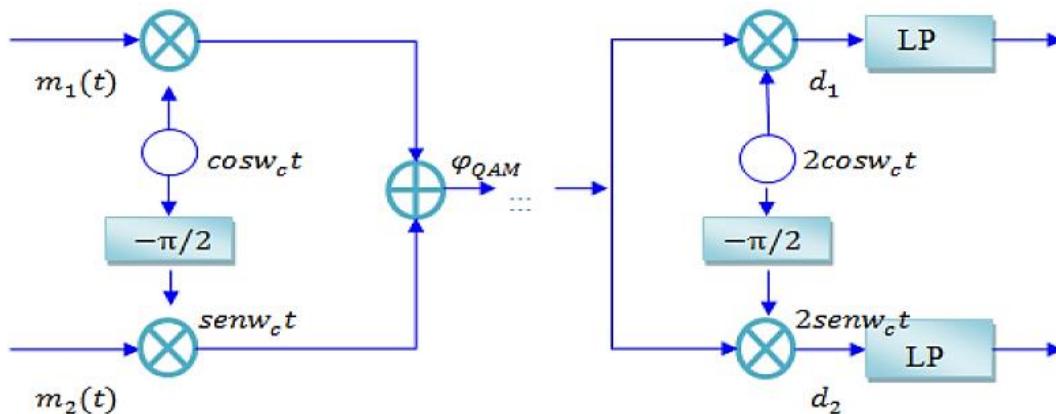


Figura 1.17 – Esquema en bloques de QAM [53].

El transmisor descompone un flujo de bits de entrada en los mensajes  $m_1(t)$  y  $m_2(t)$ ; el primero modula una portadora con una frecuencia angular  $W_0$ , mientras que el segundo mensaje modula una portadora de la misma frecuencia angular, pero desfasada  $90^\circ$  grados; la anterior definición se conoce como una componente en fase (*In phase*) y una componente en cuadratura (*Quadrature*). La señal QAM resultante es la suma lineal de las dos señales de entrada independientes, tal y como se expresa mediante la ecuación 1.3.

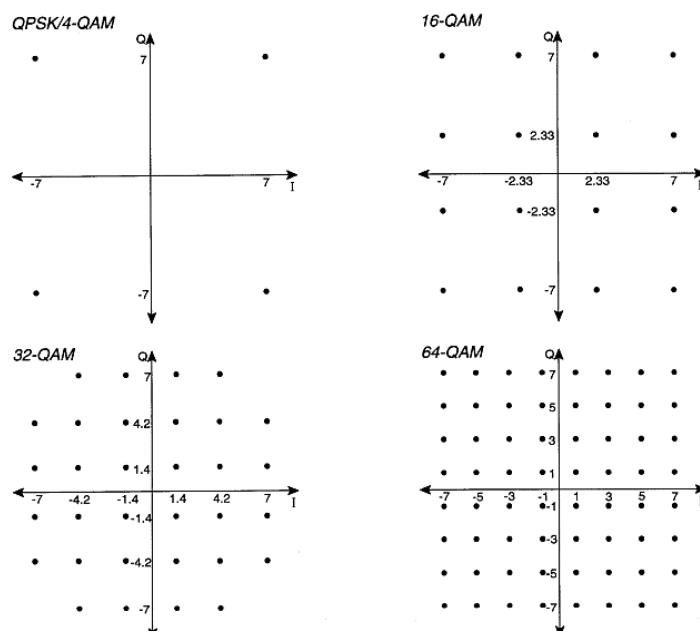
$$\delta(t) = m_1(t) \cos(\omega_0 t) + m_2(t) \sin(\omega_0 t) \quad \text{Ecuación (1.3)}$$

La señal resultante tiene dos bandas laterales en el dominio de la frecuencia y las dos señales en banda base están contenidas en cada banda lateral; en el receptor se pueden recuperar las dos señales en banda base mediante un detector o modulador síncrono. Las señales  $d_1$  y  $d_2$  son filtradas para eliminar los múltiplos de los armónicos de la señal del oscilador local y finalmente se suman linealmente; en la práctica, la sincronización es clave para el proceso de demodulación de la señal QAM, por lo que se necesita de una referencia de fase para compensar las variaciones de fase y frecuencia introducidas en el canal, trabajo que realiza el lazo PLL (*Phase-Locked Loop, Lazo de Seguimiento de Fase*) [52].

Este esquema de modulación es ampliamente utilizado en el ámbito de las comunicaciones modernas, para aplicaciones que necesitan gran velocidad de transmisión de datos, tanto en medios físicos como inalámbricos, por ejemplo, sistemas de transmisión de televisión, microondas, y satélites, ya que permite mejorar la eficiencia espectral en el ancho de banda disponible; también, los formatos M-QAM se acercan más al límite de capacidad de Shannon cuando se busca una alta eficiencia espectral, sin embargo, se necesita de un módem más complejo, aunque en la práctica, M-QAM supera las ventajas de rendimiento en comparación con su complejidad, y por tanto es más utilizada que los formatos M-PSK [54].

#### - Constelación M-QAM

La técnica M-aria define que dos o “ $K$ ” bits entrantes de información están representados dentro un símbolo en la constelación, y durante cada periodo de símbolo es transmitido uno de los  $M$  posibles símbolos de salida, para un total de  $M = 2^K$  símbolos diferentes, donde  $K$  es un entero [55]. La figura 1.18 presenta algunas de las constelaciones IQ para los formatos M-QAM.



*Figura 1.18 – Algunas constelaciones M-QAM [50].*

La forma general de M-QAM se define de acuerdo con la ecuación 1.4.

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2 * E_{\min}}{T_S}} * a_i \cos(2\pi f_o t) + \sqrt{\frac{2E_{\min}}{T_S}} * b_i \sin(2\pi f_o t) \quad \text{Ecuación (1.4)}$$

Donde:

*E<sub>min</sub>: Energía de la señal cuando la amplitud es mínima.*

*a<sub>i</sub>, b<sub>i</sub>: son enteros independientes elegidos de acuerdo con la ubicación de un punto de señal particular dentro de la constelación.*

*F<sub>o</sub>: Frecuencia de la portadora [Hz].*

*T<sub>s</sub>: Periodo de símbolo [seg].*

Algunas recomendaciones a tener en cuenta para la modulación M-QAM se describen como sigue.

- El ancho de banda mínimo para transmitir una señal QAM, denotado como *B<sub>QAM</sub>*, es dos veces el ancho de banda ocupado por la señal de información digital, denotado como *B<sub>i</sub>* [49].

$$B_{QAM} = 2 * B_i$$

*Ecuación (1.5)*

- Entre más alto orden de modulación es posible poner a la salida mayor cantidad de bits por símbolo, sin embargo, debido a la proximidad de los puntos dentro de la constelación, se presenta mayor ruido y distorsión, por

tanto una mayor BER, lo cual requiere un nivel más alto de potencia transmitida [55].

- Las formas más comunes de modulación M-QAM son 16-QAM, 64-QAM, 128-QAM y 256-QAM, estos se pueden aplicar en comunicaciones ópticas, alámbricas e inalámbricas, para servicios como televisión digital por cable, aplicaciones de dispositivos de red, televisión digital terrestre, y demás [56].
  - Los sistemas QAM preferiblemente utilizan el Código Gray, también llamado código de distancia mínima, ya que disminuye el número de bits erróneos en la transmisión.
- **Rotación de la constelación**

Esta técnica también conocida como SSP (*Signal Space Diversity, Diversidad del Espacio de Señales*) se utiliza en modulaciones digitales como QAM, con el propósito de aumentar el nivel de diversidad, esto es, agregar redundancia en los símbolos dentro de la constelación con el fin de mejorar el desempeño en el receptor dentro de escenarios de propagación difíciles. En el receptor ocurre el proceso de demodulación para determinar la señal de información transmitida, el anterior necesita de las componentes I y Q de un punto o símbolo dentro de la constelación, es decir, no es posible la estimación de la componente I a partir de la componente Q (*no existe correlación*), sin embargo, con la rotación de la constelación, cada componente I o Q es transmitida con bastante información como para determinar el símbolo transmitido en el receptor [57]. La apariencia de una constelación rotada 64-QAM es tal y como se muestra en la figura 1.19.

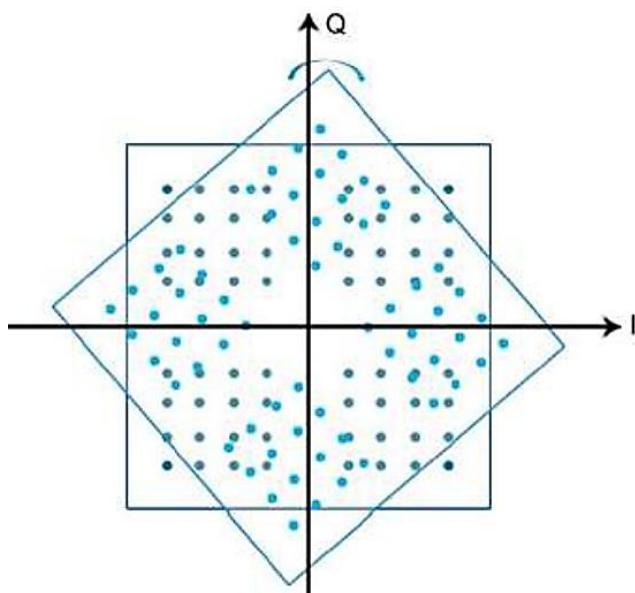


Figura 1.19 – Constelación 64-QAM rotada [53].

### **1.3.3. Análisis comparativo esquemas modulación multinivel**

En resumen, los esquemas de modulación M-PSK son más utilizados para sistemas en donde no se requieren altas velocidades de transmisión de datos, debido a que su implementación es más económica y menos compleja respecto de los sistemas M-QAM, sin embargo, el aumento de las demandas en las redes de acceso y troncales requiere de esquemas de modulación como M-QAM, aunque se requiera aumentar la potencia para lograr una BER aceptable. En la tabla 1.5 se presenta un análisis comparativo de las dos modulaciones.

PARÁMETRO	M-PSK	M-QAM
Implementaciones comunes	BPSK, QPSK, 8-PSK, 16-PSK, DQPSK	4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, 128-QAM, 256-QAM
Variación de amplitud	No	Si
Eficiencia ancho de banda	Medio	Alto
Consumo de potencia	Bajo	Alto
Sensibilidad en el receptor	Medio	Alto
Complejidad	Bajo	Alto

*Tabla 1.5 – Tabla comparativa M-PSK vs M-QAM.*

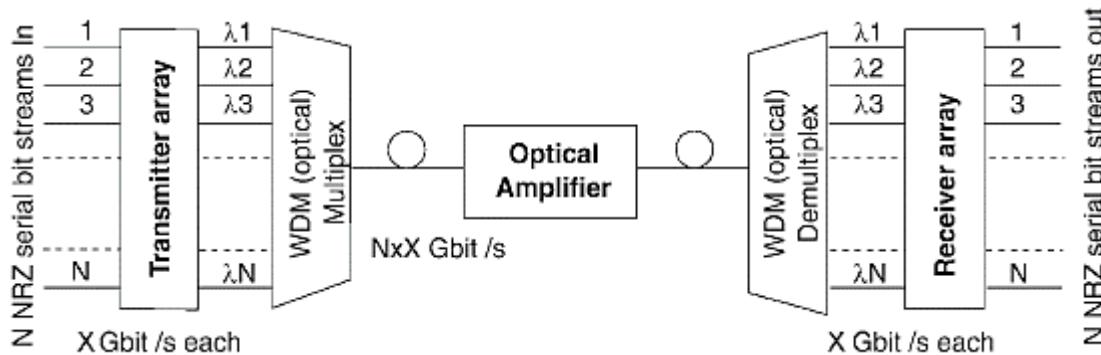
## **1.4. ESQUEMAS DE MULTIPLEXACIÓN EN SISTEMAS ÓPTICOS**

Las comunicaciones ópticas han tomado gran valor en las últimas dos décadas gracias a sus ventajas en cuanto a velocidad, capacidad y transmisión de información a grandes distancias, así mismo, cada día aparecen nuevas aplicaciones y servicios que requieren mayor capacidad de transmisión de datos, por tanto, el desempeño de las redes ópticas busca satisfacer la demanda futura de datos y aprovechar al máximo el ancho de banda que posee la fibra óptica, así mismo, para la gestión del ancho de banda se han desarrollado los ecualizadores adaptativos y técnicas de modulación avanzadas, como por ejemplo WDM y OFDM [58].

### **1.4.1. Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM)**

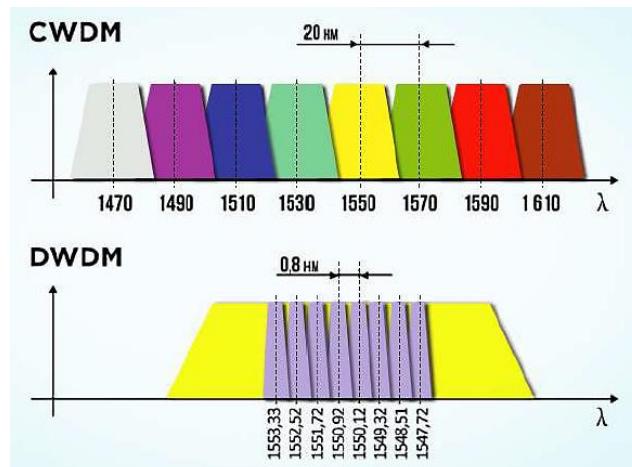
Es una tecnología que permite la transmisión de diferentes longitudes de onda sobre una misma fibra óptica dentro del plan espectral disponible para comunicaciones ópticas (1280 – 1620 nm), actualmente, es una de las tecnologías más implementadas en sistemas de comunicación ópticos, debido a que es eficiente con el ancho de banda, permitiendo mejores velocidades de transmisión de datos

para múltiples usuarios; esta tecnología tiene la desventaja de transmitir canales en un ancho de banda fijo, por lo que no se puede adaptar a las necesidades reales de transmisión, por tanto, es poco flexible para la asignación de ancho de banda dinámico de acuerdo con la densidad de tráfico [59]. En la figura 1.20 se observa un sistema de comunicaciones óptico utilizando el formato WDM, en donde varias portadoras ópticas que llevan información de diferentes transmisores ópticos, son multiplexadas en una sola fibra.



*Figura 1.20 – Sistema de comunicación óptico con WDM [60].*

Es importante hacer un uso óptimo del ancho de banda en las comunicaciones ópticas, por tanto, se implementan nuevas actualizaciones a la tecnología, tales como CWDM (*Coarse wavelength Division Multiplexing, Multiplexación por División de Longitud de onda Gruesa*) y DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing, Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa*), capaces de transmitir información en una amplia gama de longitudes de onda a diferentes velocidades y a grandes distancias [60]. La figura 1.21 presenta el plan espectral para las tecnologías CWDM y DWDM.



*Figura 1.21 – Comparación CWDM y DWDM [60].*

CWDM permite multiplexar hasta 18 longitudes de onda en una sola fibra, de acuerdo con la recomendación ITU-T G.694.2 en el rango de longitudes de onda de

1270 nm a 1610 nm, con un espaciamiento entre canales de 2500 GHz, por otra parte, es más económico respecto de la tecnología DWDM, debido a que utiliza láseres y filtros de menor calidad, así, es implementada para redes de corto y mediano alcance. Por su parte, DWDM permite multiplexar mucho más longitudes de onda respecto de CWDM, con un espaciamiento entre canales de 100 GHz sobre un mismo hilo de fibra, lo que aumenta la escalabilidad, sin embargo, la separación entre canales es más estrecha, por lo que los equipos utilizados para DWDM son más complejos y costosos; en cuanto a aplicaciones, este tipo de tecnología es ampliamente utilizada para redes troncales y de larga distancia [59].

#### 1.4.2. Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM)

Es un tipo de modulación digital MCM (*Multi-carrier modulation, Modulación Multiportadora*), a veces llamada DMT (*Discrete Multi-tone, Multi-tono Discreto*), con características de modulación y multiplexación, ya que divide la información de datos de alta velocidad en un conjunto de señales, y luego modula cada señal a una nueva frecuencia utilizando alguna técnica de modulación digital, como M-PSK o M-QAM; estas señales se envían sobre un conjunto de subcanales en banda estrecha, cada una centrada en una subportadora, debidamente espaciadas y ortogonales entre sí. Como consecuencia de transmitir los datos modulados en paralelo se tiene una duración extensa del periodo de símbolo, por tanto, la ISI dentro del canal solo afecta una porción de señal que se puede eliminar utilizando un intervalo de guarda llamado CP (*Cyclic Prefix, Prefijo Cílico*) [61]. La expresión analítica para OFDM es mostrada en la ecuación 1.6.

$$\phi_n(t) = A(t) * \exp(j2\pi f_n t) = I(t) + jQ(t) \quad \text{Ecuación (1.6)}$$

Donde:

*f<sub>n</sub>*: Frecuencia de la señal [Hz].

*n*: Número de subportadoras.

*A*: Amplitud [a.u].

El uso de la IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform, Transforma Inversa Rápida de Fourier*) caracteriza la tecnología OFDM, ya que permite la transmisión en paralelo de subportadoras ortogonales, evitando los problemas por propagación multirayecto. Seguidamente, la señal OFDM pasa por un convertidor DAC que transforma la secuencia digital a una señal eléctrica para ser enviada a través del medio de comunicación, justo antes de una conversión paralela a serial [62]. La técnica OFDM permite una mejor eficiencia del espectro de ancho de banda a muy altas velocidades de transmisión de datos y gran robustez, por tanto, es implementada por varios estándares de telecomunicaciones alámbricos e inalámbricos, como: ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line, Línea Digital Asimétrica de Suscriptores*), DVB-T (*Digital Video Broadcasting-Terrestrial, Radiodifusión de Video digital Terrestre*), Wi-Fi, LTE, WiMax (*Worldwide Interoperability for Microwave Access, Interoperabilidad Mundial para Acceso de*

Microondas) entre otros [53]. La figura 1.22 representa una señal OFDM en el dominio de la frecuencia.

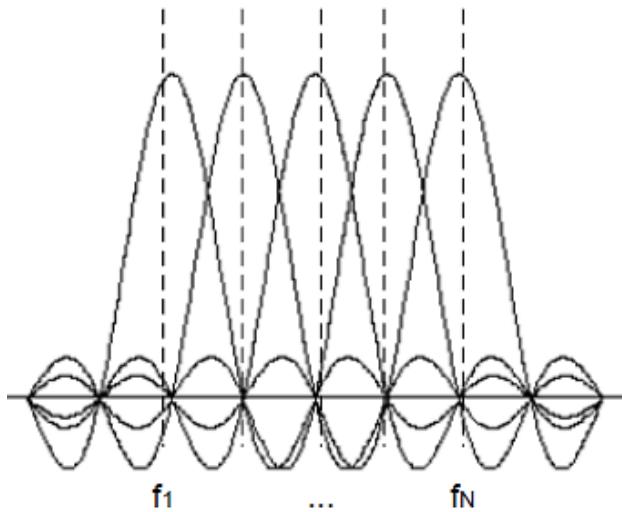


Figura 1.22 – OFDM en el dominio de la frecuencia [61].

La propiedad de ortogonalidad<sup>5</sup> busca concentrar las señales subportadoras, permitiendo la eliminación de bandas de guarda entre las mismas y, que múltiples señales sean transmitidas sobre un canal común, para ello, se debe cumplir que los nulos de las subportadoras adyacentes se encuentren justo sobre los máximos de cada subportadora [53], cumpliendo con la ecuación 1.7.

$$\int_0^{T_s} x_i(t) * y_j(t) = \begin{cases} C & \forall i = j \\ 0 & \forall i \neq j \end{cases} \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, N$$

Ecuación (1.7)

Donde:

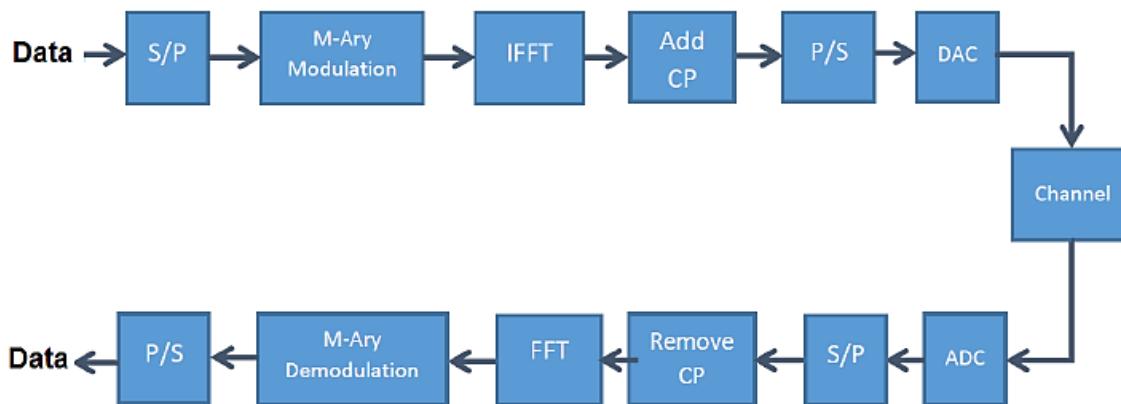
$T_s$ : Periodo de símbolo [seg].

$X(t)$  y  $Y(t)$ : dos señales adyacentes en el dominio del tiempo.

Así mismo, se debe cumplir que la separación entre subportadoras adyacentes sea igual al inverso del periodo de símbolo. Por otra parte, el ancho de banda de cada subportadora va a ser igual al ancho de banda disponible dividido por el número de subportadoras. La figura 1.23 representa el diagrama en bloques de un sistema de comunicaciones utilizando OFDM.

---

<sup>5</sup> Dos funciones son ortogonales si la integrada de la multiplicación de las señales durante el mismo periodo de símbolo es cero.



*Figura 1.23 – Sistema de comunicaciones con OFDM [47].*

Las ventajas de la tecnología OFDM han permitido que se implemente en el contexto de las comunicaciones digitales de banda ancha, tanto para redes ópticas, alámbricas e inalámbricas, algunas de las ventajas son las descritas a continuación [45].

- Eficiente contra la ISI con pérdidas SNR (*Signal Noise Relation, Relación Señal a Ruido*) mínimas, y desvanecimientos causados por la propagación multirayecto.
- Alta eficiencia espectral.
- Implementación eficiente mediante la FFT e IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform, Transformación Rápida Inversa de Fourier*).
- Eficiente contra la interferencia cocanal de banda estrecha.
- Se adapta a las condiciones hostiles del canal sin ecualización compleja.
- Altas velocidades de datos para transmisión de datos multiportadora en paralelo.
- Permite la introducción de anchos de banda dinámicos para las nuevas redes EON (*Elastic Optical Network, Red Óptica Elástica*).
- Baja sensibilidad a los errores de sincronización de tiempo.

Por otra parte, las desventajas más significativas de OFDM, son: complejidad en relación con las modulaciones de una sola portadora; perceptivo frente a los efectos de corrimiento doppler; perceptivo frente a los problemas de sincronización en frecuencia; alto PAPR (*Peak-to-Average-Power Ratio, Potencia Pico a Potencia Promedio*) y sensibilidad al ruido de fase [47].

### 1.4.3. OFDM óptico

En [45], se dice que el avance hecho en el procesamiento digital de señales ha permitido la introducción del esquema de modulación OFDM en las comunicaciones ópticas desde el año 2005; la transmisión de información en las redes ópticas mediante una sola portadora sugiere un uso ineficiente del espectro, sin embargo, la demanda de mayor velocidad de transmisión de datos con un gran ancho de banda requiere una búsqueda de soluciones como, más tendidos de fibra óptica (*no tan eficiente*), o la optimización del ancho de banda óptico con asignaciones dinámicas, así, OFDM es una solución prometedora para ser implementada en comunicaciones ópticas.

La señal OFDM utilizada en comunicaciones inalámbricas de RF no puede ser utilizada en las comunicaciones ópticas, ya que la señal OFDM es compleja y bipolar, mientras que los formatos O-OFDM (*Optical OFDM, OFDM Óptico*) utilizan modulación en intensidad (*la información se transmite con la variación de la potencia óptica*), que requiere que los símbolos sean unipolares y reales, así, se utiliza la simetría hermética en la señal antes de la realización de la IFFT [63]. Hay varias soluciones que han sido desarrolladas para obtener una señal positiva, como: DCO-OFDM (DC-biased O-OFDM, *OFDM Óptico con sesgo de DC*), ACO-OFDM (*Asymmetrically Clipped O-OFDM, O-OFDM Recortado Asimétricamente*) y Flipped-OFDM (*OFDM Volteado*), sin embargo, la eficiencia en la potencia para O-OFDM se reduce con la utilización de señales unipolares [35]. Algunas técnicas para implementar simetría hermética se presentan a continuación.

#### - ACO-OFDM

Los sistemas ACO-OFDM son una alternativa que puede ser utilizada con el fin de obtener señales positivas dentro de los sistemas que implementan modulación en intensidad con detección directa. Su funcionamiento se basa en la modulación sólo de las subportadoras impares y poner a cero las pares, recortando la señal a nivel de cero sin la adición de ruido y sin pérdida de información; lo anterior produce un uso ineficiente del espectro, ya que la información se transmite solo en la parte positiva, las ventajas se observan en una reducción de la potencia óptica [63]. Las frecuencias impares cumplen la ecuación 1.8.

$$x(n, k) = -x\left(n + \frac{N}{2}, k\right) \quad \text{Ecuación (1.8)}$$

Donde:

N: Número de subportadoras.

X: Vector de entrada al bloque de transformación.

- **DCO-OFDM**

Los sistemas DCO-OFDM se utilizan dentro de la modulación en intensidad para obtener señales positivas, su funcionamiento se basa en la adición de un nivel de corriente continua y luego recortar por el nivel de cero, lo anterior hace que se aumente el nivel de potencia ineficientemente. El ruido al momento del recorte disminuye el rendimiento del sistema, así mismo, se podría aumentar el nivel de DC para disminuir tal ruido, pero ello causaría una relación más alta de energía de bit a densidad de ruido ( $E_b/N_0$ ) para lograr una BER aceptable [63].

Por otra parte, existen dos subdivisiones para OFDM óptico de acuerdo con la técnica utilizada para la detección en el receptor, con sus respectivas ventajas y desventajas al utilizarlas en escenarios de comunicaciones ópticas, sin embargo, la técnica por detección coherente presenta un desempeño superior respecto a la detección directa en términos de sensibilidad en el receptor y eficiencia espectral [47].

- **Detección Directa OFDM Óptico (DD-OOFDM)**

El diagrama de bloques para un sistema de comunicaciones que implementa la tecnología DD-OOFDM (*Direct Detection - Optical OFDM, Detección Directa – OFDM Óptico*) es mostrado como en la figura 1.24. Con la demanda de redes ópticas robustas y rentables a cortas distancias, menores a 100 Km, en donde no se requiera una amplificación óptica, los sistemas IM/DD-OOFDM son fuertes candidatos a ofrecer esta solución gracias a su flexibilidad, confiabilidad, manipulación, instalación sencilla y su bajo costo. Su funcionamiento precisa una conversión eléctrica a óptica mediante un láser modulado y un fotodetector en el receptor que detecta las variaciones de potencia óptica del pulso y la transforma en corriente eléctrica [45].

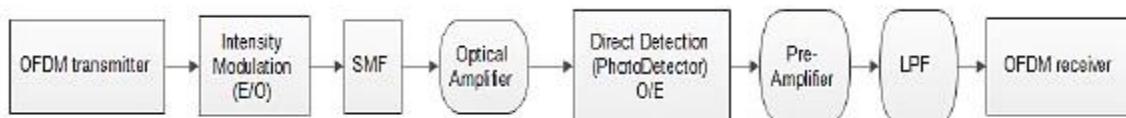


Figura 1.24 – Diagrama de bloques para IM/DD-OOFDM [45].

En la figura 1.24, el transmisor OFDM produce una señal eléctrica OFDM que se modula en intensidad para pasarla al dominio óptico; la señal óptica resultante se transmite por la fibra óptica y si se requiere, un amplificador es implementado para compensar las pérdidas de potencia dentro de la fibra. Posteriormente, la señal OFDM se recupera de la señal óptica transmitida por el receptor mediante un foto detector. Como consecuencia de transmitir la portadora óptica junto con la señal OFDM, se pierde una parte de la potencia total de transmisión, lo que implica en degradaciones OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio, Relación Señal a Ruido Óptico*), sin embargo, una solución prometedora es implementar ecualización

dividendo la potencia de transmisión entre la portadora óptica y la banda lateral OFDM [47].

#### - Detección Coherente OFDM Óptico (CO-OOFDM)

Fue propuesto inicialmente por Shieh y Athaudage [64], para combatir la dispersión cromática de la fibra. Los sistemas CO-OFDM (*Coherent Optical OFDM, OFDM Óptica Coherente*) requieren una mayor dificultad en el diseño de los transceptores en comparación con la tecnología anteriormente mencionada IM/DD-OOFDM, sin embargo, tienen mejor eficiencia de ancho de banda, son robustos frente a dispersión de polarización y sensibilidad en el receptor [65]. La figura 1.25 presenta el diagrama de bloques de un sistema de comunicaciones óptico que utiliza la tecnología CO-OFDM.

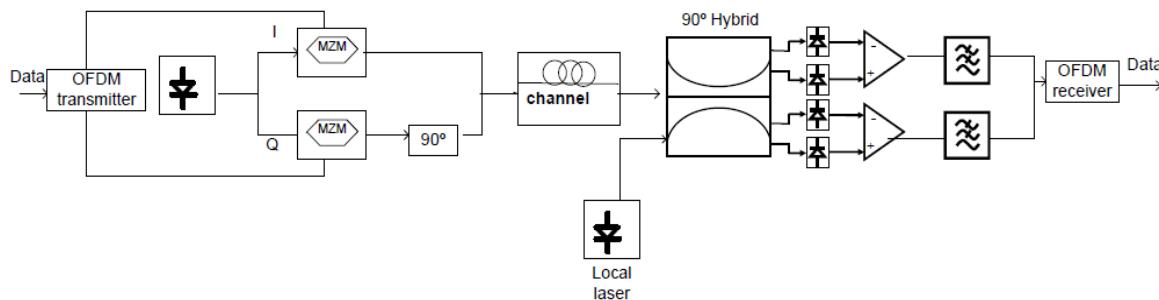


Figura 1.25 – Diagrama de bloques para CO-OFDM [45].

La señal OFDM eléctrica es convertida al dominio óptico por medio de un modulador I/Q óptico, utilizando Moduladores MZM, esta señal es enviada por la fibra óptica para ser entregada al receptor; la diferencia con los sistemas IM/DD-OOFDM es que la portadora óptica no es transmitida con la señal OFDM óptica modulada, pero es generada de manera local en el receptor mediante un láser local, con la ventaja de utilizar menos potencia para transmitir, aunque permite mayor sensibilidad frente al ruido de fase [65].

Como se observa en la figura 1.25, la señal del oscilador local es mezclada con la señal OFDM óptica en el receptor por medio del bloque “optical 90° Hybrid”<sup>6</sup>, encargado de realizar la detección óptica de las señales en fase y en cuadratura, acto seguido, cuatro foto detectores son utilizados para recuperar la señal eléctrica, dos para la componente en cuadratura y dos para la componente en fase de la señal recibida. Finalmente, ambas componentes son pasadas por un bloque de filtro pasa bajas y demoduladas en el bloque OFDM receptor [63].

<sup>6</sup> **optical 90° Hybrid**, bloque importante en sistemas de transmisión coherente, el cual mezcla la señal entrante con la señal del oscilador local en el plano real y complejo, luego entrega las cuatro señales de luz a dos pares de fotodetectores balanceados [77].

*Nota de autor:*

*Los autores resaltan la importancia que tiene la realización del presente capítulo, en el cual se aborda el núcleo temático de la investigación, tales como: las arquitecturas a nivel físico para las redes de fibra óptica pasivas, con sus respectivas características y escenarios de coexistencia con las redes convencionales; así mismo, un compendio teórico sobre las redes convergentes de radio sobre fibra óptica, en el cual se aprecia las ventajas y desventajas de los esquemas de transporte analógicos y digitales sobre una red RoF, consecutivamente, las aplicaciones e investigaciones actuales en campo de las redes RoF, así como los esquemas de multiplexación y modulación avanzados, con sus respectivas ventajas, desventajas, y técnicas para implementar sobre la red RoF. Las anteriores temáticas permitieron enfocar y contextualizar la investigación, ofreciendo una vía de desarrollo para obtener objetivos claros y específicos. En conclusión, los sistemas por detección coherente presentan mayor complejidad y costo para las redes de acceso óptico, en comparación con los sistemas por detección directa, por lo anterior, el desarrollo de la presente investigación se basa en el sistema IM/DD con OFDM óptico.*

## **CAPÍTULO 2.**

### **HERRAMIENTAS, METODOLOGÍAS Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN**

En el presente capítulo, se desarrolla un estudio de las principales herramientas de simulación utilizadas para modelar redes de comunicaciones, a fin de obtener un cuadro comparativo que defina la herramienta de simulación más apropiada para la realización del presente proyecto de investigación; así mismo, se presenta un estudio de los principales modelos metodológicos en un entorno de ingeniería, teniendo en cuenta los objetivos del trabajo de investigación, el alcance, los costos, casos de estudio y el análisis de las simulaciones resultantes.

Una vez se tiene una programación sistemática de las actividades a realizar dentro de la investigación y la herramienta de simulación, es hora de generar los escenarios de simulación que mejor se adapten a un entorno real, así, se presenta en el presente capítulo el modelo para una infraestructura de red convergente OFDM-RoF/XG-PON y para una infraestructura de red convergente OFDM-RoF/XGS-PON.

#### **2.1. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN**

La implementación de cualquier sistema de comunicación, requiere fases previas de estudio y análisis, de igual manera en cualquier investigación sobre el desempeño de determinada red, como en este trabajo, se necesitan los medios que permitan examinar los planteamientos teóricos. Los softwares de simulación se convierten en una herramienta fundamental para reducir riesgos en inversión, crear prototipos rápidos y observar de forma global el rendimiento de un sistema, esto permite determinar la viabilidad, aprobar o refutar posibles esquemas, arquitecturas o tecnologías en la instalación real de una red.

A continuación se mencionan y describen las principales características de algunas de las herramientas con las que se trabaja en sistemas de comunicación ópticas y que son opciones para el desarrollo de este trabajo de investigación. Ya que nuestra institución puede ofrecer los equipos y su licencia en caso de necesitarse, después de analizar las herramientas, se selecciona la que permita mayores ventajas de acuerdo a nuestra arquitectura de red planeada.

##### **2.1.1. MATLAB**

MATLAB (*Matrix Laboratory, Laboratorio de Matrices*) es un software de computación matemático, que funciona a partir del lenguaje de programación desarrollado por su propietario MathWorks y está disponible para las plataformas

GNU/Linux, Windows, Mac OS y Unix. Esta herramienta permite la operación de matrices, creación de gráficas y representación de datos, implementación de algoritmos, realización de interfaces de usuario y la interacción con herramientas en otros lenguajes y diferentes equipos hardware. Matlab expande los beneficios prestados con plataformas en su entorno como Simulink, para simulaciones multidominio, con esto, se visualizan e implementan diagramas que permiten modelar y simular sistemas, lo que resulta muy útil antes de una posible implementación hardware [66].

Entre las diversas utilidades de MATLAB, se tiene: analítica de datos, simulación de sistemas de telecomunicaciones, procesamiento digital de señales, sistemas de control, robótica, machine learning, visión artificial, finanzas cuantitativas, etc. Lo que la convierte una de las herramientas muy utilizada en las áreas de ingeniería, y la ciencia. La figura 2.1 representa el logo de esta herramienta.

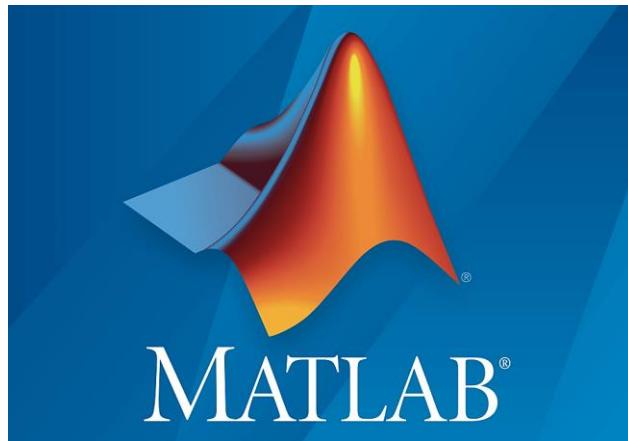


Figura 2.1 – Logo de la herramienta MATLAB [66].

### 2.1.2. OptiSystem

Desarrollada por Optiwave Systems, OptiSystem es una herramienta integral de diseño de software que ofrece a los usuarios la capacidad para modelar, simular y evaluar enlaces en la capa de transmisión de las redes ópticas actuales. Este software fotónico permite realizar pruebas en el dominio del tiempo o de la frecuencia, analizar de manera visual diversos escenarios, evaluar los parámetros de rendimiento del sistema, tales como: factor Q, BER, OSNR, figura de ruido, potencia de la señal, ganancia, diagramas de constelación, estados de polarización y efectos lineales o no lineales [67].

OptiSystem posibilita el diseño de sistemas FSO (*Free Space Optics*, Óptica de Espacio Libre) y RoF, la implementación de diferentes formatos de modulación, amplificadores, láseres, el diseño de componentes transmisor/receptor, enlaces de transmisión monomodo y multimodo, procesamiento de señales y el diseño de redes

OFDM, OTDM (*Optical Time Division Multiplexing, Multiplexación por División de Tiempo Óptico*), DWDM, PON, OCDMA (*Optical Code Division Multiple Access, Acceso Múltiple por División de Código en el entorno Óptico*), etc. Además ofrece la interacción con otras herramientas como MATLAB, pero extiende su capacidad de simulación mediante la herramienta OptiPerformer desarrollada por Optiwave, la cual presenta funcionalidades optimizadas, automatiza y crea escenarios específicos de diseño dinámico con mayor facilidad de uso. El logo de OptiSystem se observa en la figura 2.2.

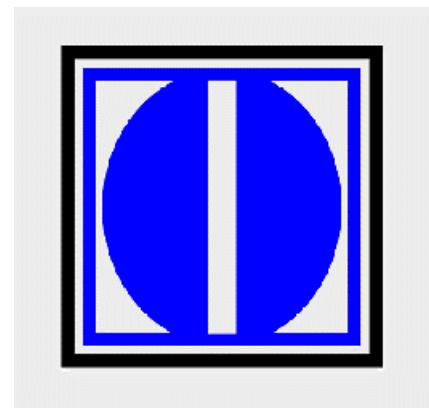


Figura 2.2 – Logo de la herramienta OptiSystem [67].

### 2.1.3. OptSim

Este software de Synopsys desarrollado por Rsoft, es una herramienta especializada para el diseño y simulación de sistemas de comunicación óptica. Soportado plataformas Windows y Linux, proporciona una gran precisión y usabilidad, mediante técnicas de simulación modernas, una interfaz gráfica de fácil manejo, e instrumentos de medición similares a los de un laboratorio; Optsim permite interactuar y trabajar en conjunto con MATLAB, encajando con el lenguaje y el modelado de Simulink, con una interfaz gráfica potente; facilita el análisis y permite el procesamiento de mediciones basadas en múltiples escaneos de parámetros. Además cuenta con múltiples motores que implementan el FDSS (*Frequency-Domain Split-Step, Dominio de la Frecuencia por Pasos Separados*) y TDSS (*Time-Domain Split-Step, Dominio del Tiempo por Pasos Separados*) para obtener la simulación más precisa y eficiente de cualquier arquitectura de enlace óptico [68].

La simulación en esta herramienta se puede realizar a partir de dos técnicas, STP (*Spectral Propagation Technique, Técnica de Propagación Espectral*) en el dominio del espectro y VBS (*Variable Bandwidth Simulation, Técnica de Ancho de Banda Variable*) en el dominio del tiempo. En STP las señales se propagan como espectros de potencia permitiendo la evaluación de OSNR y espectro óptico. En VBS las señales se propagan como muestras en el dominio del tiempo sobre un ancho de banda variable, por lo que facilita analizar las pérdidas en la fibra, los efectos lineales y no lineales. La figura 2.3 representa el logo de Optsim.



*Figura 2.3 – Logo de la herramienta OptSim [68].*

#### **2.1.4. Análisis comparativo herramientas de simulación**

Luego de analizar las tres herramientas, se organiza de manera comparativa las características más relevantes en la tabla 2.1, con el fin de elegir la herramienta que permita cumplir con los alcances planteados para llevar a cabo el desarrollo de este trabajo de grado.

Parámetro	MATLAB	OptiSystem	Optsim
Interfaz gráfica	Alta	Alta	Alta
Uso investigativo	Alto	Alto	Alto
Lenguaje de programación	Alto	Bajo	Bajo
Licencia	Comercial	Comercial	Comercial
Grafica de resultados	Buena	Buena	Buena
Simulador con propiedades ópticas	No	Si	Si
Implementa sistemas RoF	No	Si	Si
Sistema requerido	Windows, Linux, MAC OS, Unix	Windows	Windows, Linux
Integración con otras herramientas	Si	Si	Si

*Tabla 2.1 – Tabla comparativa herramientas de simulación.*

De acuerdo con la tabla 2.1, se descarta la herramienta MATLAB puesto que presenta características similares a las demás pero no ofrece un simulador con propiedades o librerías de sistemas ópticos. Tanto OptiSystem como Optsim son diseñados especialmente para el modelado y simulación de sistemas de comunicación ópticas, ambos ofrecen un entorno ideal para los sistemas RoF, sin embargo, se decide utilizar OptSim para el desarrollo de este trabajo de investigación, ya que ofrece una librería más extensa con múltiples dispositivos usados comercialmente, el uso de formatos de modulación avanzados y muchos

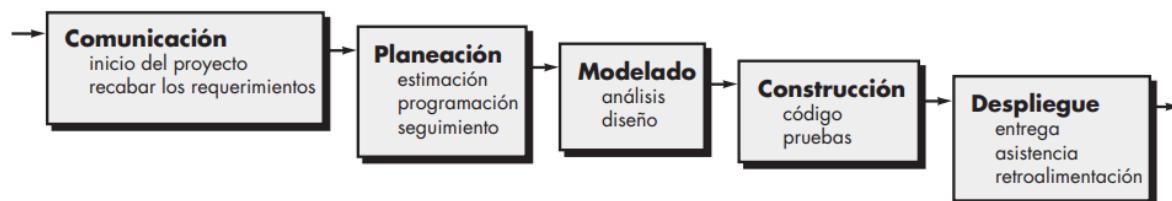
más parámetros de escaneo para unos resultados de simulación precisos y eficientes.

## 2.2. METODOLOGÍAS

Como parte fundamental del trabajo de investigación para el profesional en ingeniería dentro de un contexto de investigación, desarrollo e innovación, se define la metodología de investigación con la cual se realiza el presente proyecto de investigación, y la metodología de simulación que define el cronograma a seguir por parte del investigador para la realización de las simulaciones necesarias dentro del proyecto. En la presente sección se define como metodología de investigación un modelo en cascada, así mismo, se presentan diferentes metodologías de simulación a fin de obtener la que mejor se adapta al proyecto.

### 2.2.1. Metodología de investigación

La metodología a utilizar para el desarrollo del presente trabajo de grado es el modelo lineal secuencial, también llamado “modelo ciclo de vida clásico” o “modelado en cascada”; este modelo sugiere un enfoque sistemático y secuencial del desarrollo de software que comienza con la captura de requisitos y avanza a través de diferentes etapas hasta alcanzar el objetivo propuesto; teniendo en cuenta el modelo lineal secuencial, las fases a ejecutar son: fase de captura y análisis de requerimientos, fase de recolección de información, fase de diseño, fase de análisis y resultados, y para concluir, la fase entrega [69]. En la figura 2.4, se encuentra un esquema que ilustra el diagrama en bloques del modelado en cascada.



*Figura 2.4 – Modelado en cascada [69].*

De la figura 2.4 se observa el orden que se debe seguir en la realización de proyectos de ingeniería de software, comenzando de izquierda a derecha, con la fase de comunicación, que tiene como objetivo elaborar requerimientos específicos del proyecto de forma clara y precisa, negociado y validado por el cliente de antemano; la fase de planeación define concretamente la programación de las actividades, el recurso requerido para los productos de trabajo objetivo y los riesgos probables; la fase de modelado, a fin de crear el diseño general del producto donde se incluyan los requerimientos del software. Seguidamente, la fase de construcción dividida en la generación de código y la realización de pruebas dentro del producto de trabajo, y por último, la fase de despliegue en donde se hace la entrega del producto software al cliente a fin de obtener una validación y retroalimentación del

producto [69]. En base a la metodología en cascada, la presente investigación se plantea la ruta a seguir en cada fase, como sigue:

- **Fase de comunicación:** en donde se realizó un anteproyecto en el cual se definían aspectos relevantes para la investigación, el planteamiento de problema, el estado del arte, el objetivo general, los objetivos específicos, aspectos económicos, entre otros.
- **Fase de planeación:** en donde se realizó un aporte teórico investigativo profundo de las temáticas a desarrollar, también se caracterizaron las metodologías de investigación y simulación para desarrollar con éxito los objetivos propuestos.
- **Fase de modelado:** se definió un modelo conceptual general del sistema a analizar, donde se incluían los requerimientos esenciales para la evaluación de la técnica de modulación M-QAM dentro de una infraestructura de red convergente OFDM-RoF/XG-PON a OFDM-RoF/XGS-PON.
- **Fase de construcción:** se definió un modelo de red del sistema dentro de la herramienta de simulación más apropiada para el proyecto, posteriormente, se realizaron pruebas y análisis dentro del producto de trabajo a fin de obtener conclusiones relevantes.
- **Fase de despliegue:** se realiza la documentación respectiva (*Esta actividad estará presente desde el inicio hasta el final del trabajo, se desarrolló en conjunto con las fases anteriores*), también, un artículo de aporte a la línea de investigación y trabajos futuros en los cuales se puedan basar en la presente investigación, para finalmente, realizar la sustentación de la tesis planteada.

Por lo anterior y cumpliendo con el modelo lineal secuencial descrito, se presenta en la figura 2.5 el diagrama de Gantt en donde se evidencia la línea de tiempo estipulado para la ejecución de cada actividad, que enmarca alguna de las fases descritas anteriormente; el periodo de realización de este proyecto es de 9 meses.

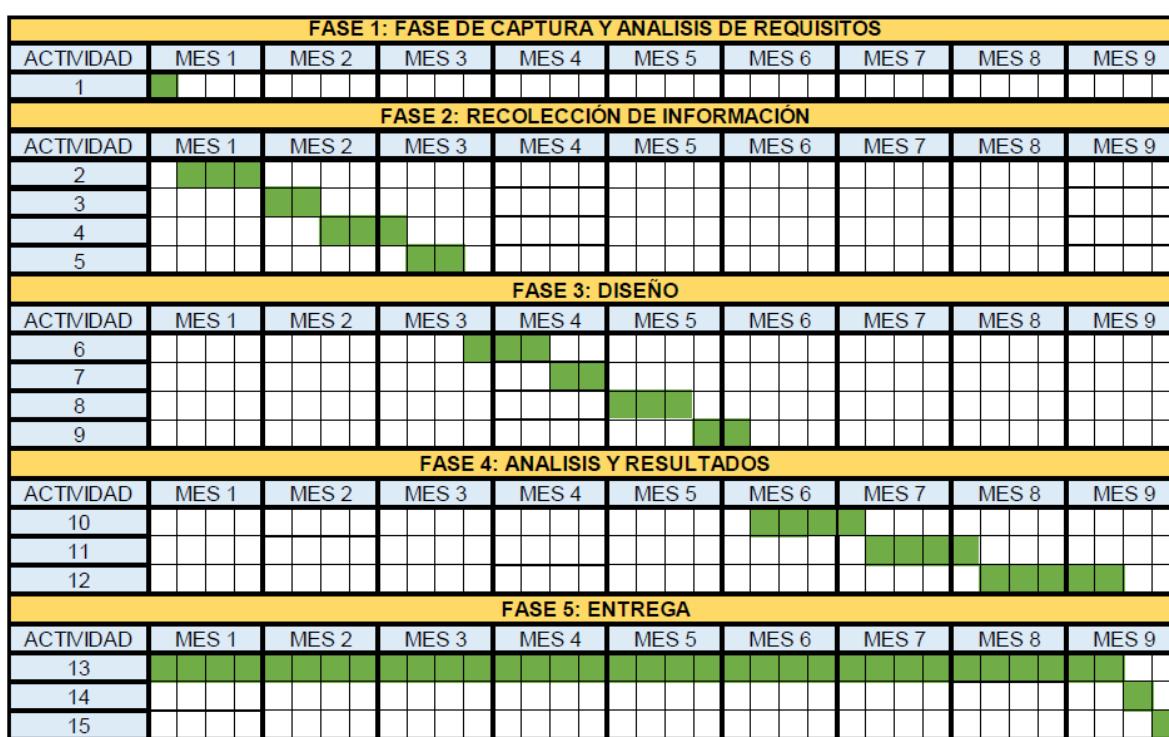


Figura 2.5 – Cronograma de actividades.

## 2.2.2. Metodología de simulación

El señor Claude Elwood Shannon en 1975, definió el concepto de simulación como “el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experiencias con él, con la finalidad de aprender el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias para el comportamiento del sistema”. Existen dos métodos para estudiar determinado sistema, ya sea experimental o por medio de un modelo que represente al sistema, sin embargo, el método experimental pudiera tener limitaciones de costo dentro de un proyecto, así mismo, el sistema a evaluar pudiera no existir aún, por lo que la construcción de un modelo que represente al sistema es entonces la mejor alternativa [70].

Varias son las clasificaciones dentro del cual cabe cierto modelo de simulación; según [71], se presenta una clasificación de los modelos de simulación, como:

- **Según la forma:** que pueden ser modelos discretos o continuos, en la cual el comportamiento del modelo de simulación puede o no, cambiar en el tiempo.
- **Según el comportamiento de las variables:** que pueden ser modelos determinísticos o aleatorios, en el cual existen o no, variables de tipo probabilístico.

- **Según el manejo del tiempo:** ya sea modelos estáticos o dinámicos, en donde se puede realizar la simulación en un instante de tiempo determinado o en un periodo de tiempo, respectivamente.

A continuación, se presentan tres metodologías estudiadas para el desarrollo de las simulaciones que comprende el proyecto de investigación, a fin de obtener la más adecuada.

- **Metodología dinámica de sistemas [72]**

La dinámica de sistemas fue desarrollada en el MIT (*Massachusetts Institute of Technology, Instituto de tecnología de Massachusetts*) por Jay W. Forrester, quién sistematizó esta nueva tecnología con el objetivo del “diseño de empresa”, para crear mejores políticas de dirección y mejores estructuras organizativas. Posteriormente, tuvo una amplia acogida y al analizar y modelar el comportamiento de diferentes tipos de sistemas dinámicos en entornos complejos; según [72], la dinámica de sistemas se define como una metodología para la elaboración de modelos de simulación y que, según criterio de quien esto escribe, se pueden adaptar para la simulación de redes de telecomunicaciones.

Así mismo, autores como Richardson y Pugh, centran la atención en desarrollar un orden metodológico para un modelo dinámico; en la figura 2.6 se presenta el esquema metodológico descrito por los autores.

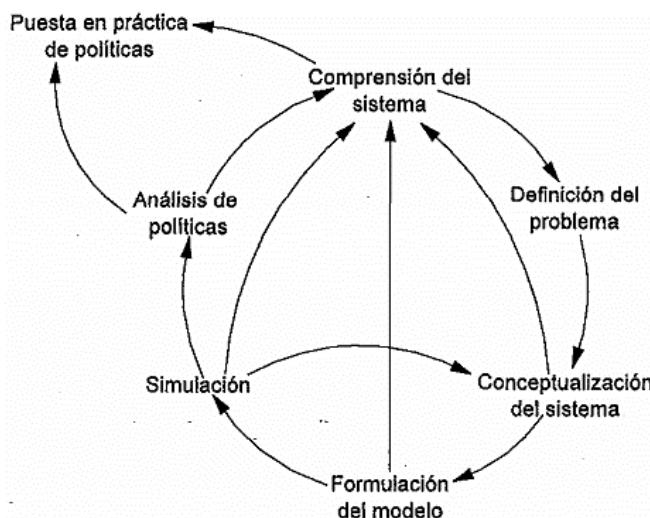


Figura 2.6 – Esquema de modelización para dinámica de sistemas [72].

De la figura 2.6, se presentan siete fases para la solución de un problema desde la perspectiva de dinámica de sistemas, así mismo se observa que inicia y finaliza con la comprensión del sistema, formando una realimentación que caracteriza el proceso de manera iterativa, las fases son:

1. Identificación y definición del problema.
2. Conceptualización del sistema.
3. Formulación del modelo.
4. Análisis del comportamiento del modelo.
5. Evaluación del modelo.
6. Análisis de políticas.
7. Implementación o empleo del modelo.

- **Metodología para la simulación en un ambiente OMNET++ [73]**

Este tipo de metodología de simulación está descrita dentro del manual de usuario para OMNET++, y define 6 pasos a seguir para culminar con éxito el proceso de simulación, y garantizar cierta fiabilidad de los resultados [73], como:

- **Definición del sistema:** precisa toda aquella actividad en la cual se critica sobre las interrogantes planteadas en el sistema, así como, las hipótesis que se pretenden validar con el fin de concretar los objetivos propuestos.
- **Formulación del modelo:** es el diseño del sistema de interés sobre el cuál se toma la información y los datos pertinentes.
- **Implementación del modelo:** consiste en un sistema de ordenador a un lenguaje de programación específico, que permita la obtención de los datos de salida dentro del modelo de interés.
- **Validación:** precisa verificar el comportamiento del modelo implementado dentro del programa de ordenador y corregir equivocaciones.
- **Implementación:** se dispone de realizar las simulaciones pertinentes a fin de obtener la información que permita una respuesta a las hipótesis inicialmente planteadas.
- **Adquisición y análisis:** una vez se hayan realizado las correcciones pertinentes respecto del modelo de simulación, es hora de la adquisición, procesamiento y análisis de los datos de salida de la simulación.

En la figura 2.7 se presenta un algoritmo de simulación para la herramienta Optsim referenciado de [28], quién realizó una adaptación al modelo de simulación en un ambiente OMNET++, siguiendo los parámetros anteriormente descritos.

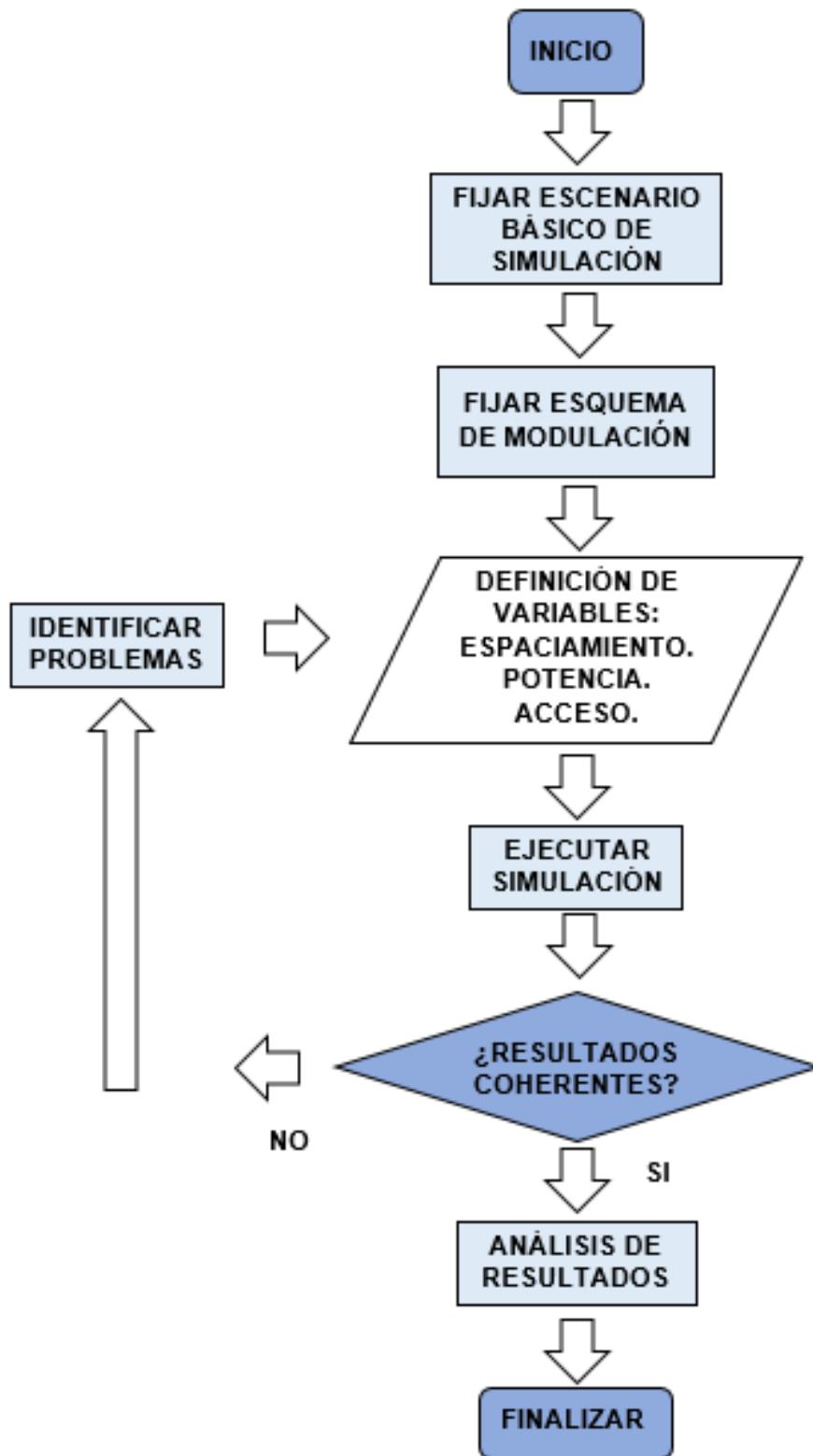


Figura 2.7 – Algoritmo simplificado de simulación [28].

- **Metodología de simulación de equipos de telecomunicaciones [71]**

Para entender el punto de partida para el diseño de metodologías, se presentan 4 ítems para la solución de problemas y con los cuales la ingeniería del software realiza la semejanza para el modelado de sistemas [69], como:

1. Comprender el problema → “*Comunicación y análisis*”.
2. Planeación → “*Modelado y diseño del software*”.
3. Ejecución → “*Generación del código*”.
4. Validación → “*Probar y asegurar la calidad*”

Ahora bien, la metodología en cuestión fue desarrollada en la Universidad del Cauca, en el año 2004, dentro del contexto de una tesis de grado por el señor J. M. Muñoz, a nombre de: “*Metodología para la simulación de equipos de telecomunicaciones*”; se definen distintas etapas para la simulación de sistemas de telecomunicaciones, así mismo, es implementada en varios trabajos de investigación dentro del departamento de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la misma universidad, es de resaltar, el trabajo de maestría de [1], llamado “*Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios QUAD play al integrar un módulo RoF*”, en donde se realiza una adaptación de la metodología para la simulación de equipos de telecomunicaciones, las etapas de la metodología son:

- **Comprensión del problema y plan de estudios:** se genera un estado del arte en el contexto del problema a solucionar a fin de estudiar el sistema dentro de las hipótesis que se pueden plantear, las interrogantes, dificultades y el alcance-costo del proyecto.
- **Adquisición y procesamiento de datos:** se deben identificar las variables esenciales dentro del sistema, que evalúen objetivos claros dentro de la investigación en pro de ser analizadas más adelante.
- **Modelo conceptual:** se diseña un esquema en bloques guía, que pretenda adaptar el sistema de la vida real a un modelo lógico – matemático.
- **Modelo de simulación:** se diseñan los escenarios de simulación dentro de la herramienta de simulación.
- **Pruebas:** se identifican las pruebas vitales que se deben realizar para evaluar el comportamiento del modelo implementado.
- **Implementación de escenarios de simulación:** se plasman dentro de la herramienta de simulación, los escenarios de simulación desarrollados.
- **Evaluación del modelo:** se valora el comportamiento de los escenarios de simulación, plantear otras interrogantes, y evaluar los parámetros estimados.

- **Validación:** aspectos asociados a la corrección de errores.
- **Análisis:** se simula el sistema y se procede a estudiar la información que proyecta.
- **Obtención de resultados:** se generan tablas, funciones estadísticas, correlaciones para los parámetros OPM que permitan evaluar el “*Efecto de la técnica de modulación M-QAM para una infraestructura de red convergente OFDM-RoF/XG-PON a OFDM-RoF/XGS-PON*”.
- **Documentación:** Se genera un registro técnico de la implementación del sistema y de sus resultados.

En la figura 2.8, se presenta el esquema metodológico para la simulación.

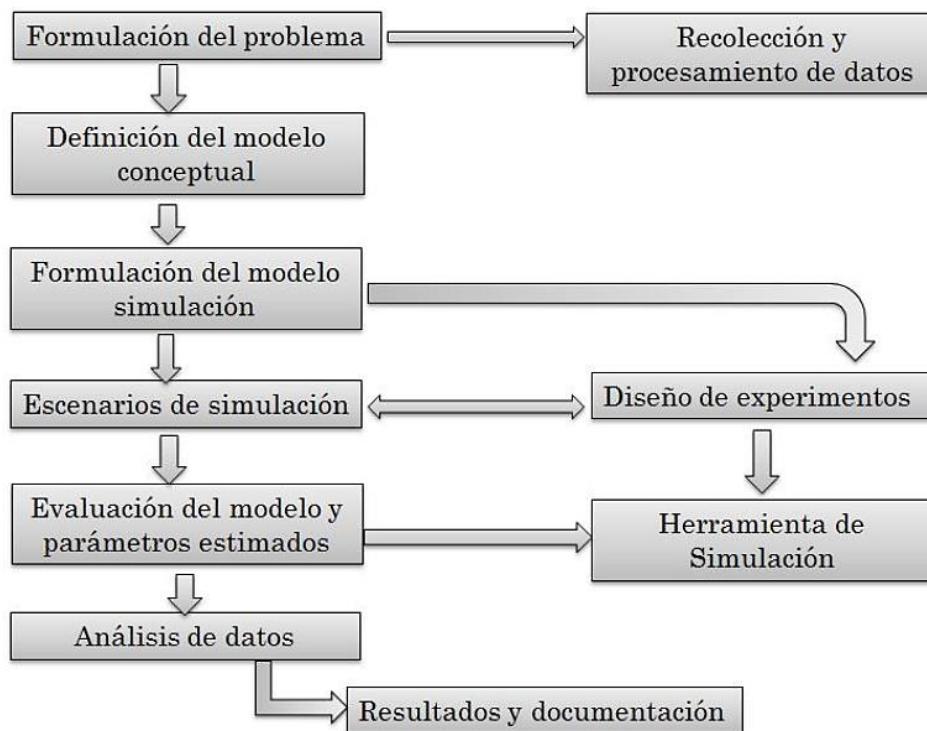


Figura 2.8 – Metodología de simulación para la investigación [40].

### **2.2.3. Análisis comparativo metodologías de simulación**

Características	Metodología en dinámica de sistemas según Richardson y Pugh.	Metodología para la simulación en un ambiente OMNET++.	Metodología para la simulación de equipos de telecomunicaciones.
Complejidad	Baja	Media	Media
Número de etapas	7	6	11
Año de desarrollo	1981	2004	1995
¿Adaptación para la metodología de simulación de la presente investigación?	Sí	Sí	Sí
¿Realimentación?	Sí	Sí	Sí
Tipo de modelo	Iterativo	Iterativo	Iterativo

*Tabla 2.2 – Características de las metodologías estudiadas.*

Considerando las descripciones para las metodologías de simulación propuestas, en la presente investigación se implementa la metodología para la simulación de equipos de telecomunicaciones; las razones son: permite una adaptación para la presente investigación; el proceso de obtención de los modelos de simulación es más detallado respecto de las otras, sacrificándose por un mayor número de etapas; el mentor que realizó la adaptación se encuentra defendiendo la presente investigación, lo cual es importante en el momento de resolver dudas eficientemente sobre algún ítem en particular de la metodología.

## **2.3. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN**

En la sección anterior, se planteó un contexto metodológico con el cual obtener objetivos claros y concretos dentro de la investigación, ahora bien, es preciso diseñar el modelo conceptual de un sistema de comunicaciones transmisor/receptor basado en una infraestructura de red convergente OFDM-RoF/XG-PON e implementar tal modelo conceptual en Optsim. El diagrama de flujo para la realización de los escenarios de simulación dentro de Optsim se observa en la figura 2.9.

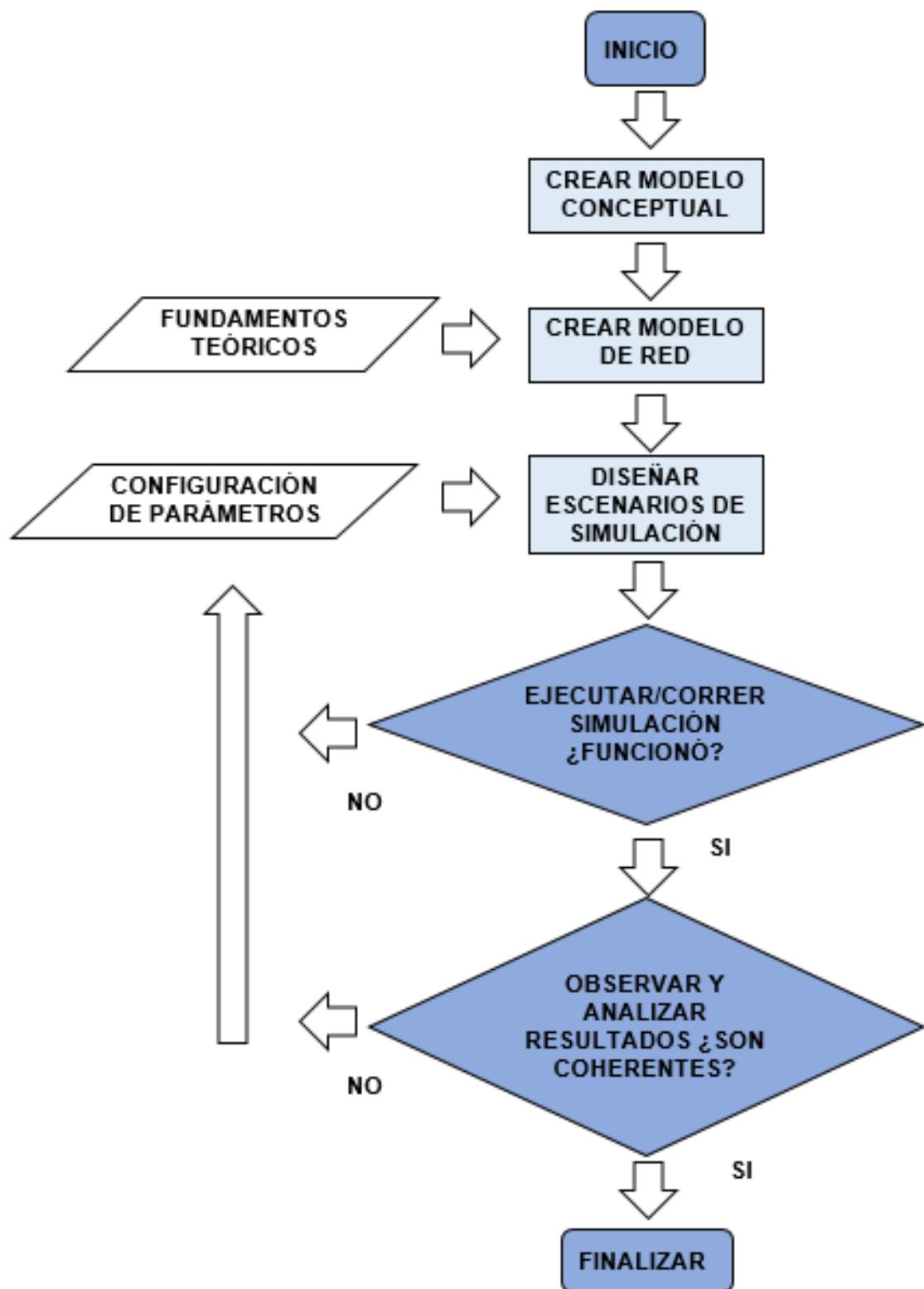


Figura 2.9 – Algoritmo de simulación [1].

### 2.3.1. Modelo de red convergente OFDM-RoF de tipo XG-PON

El primer bloque de la figura 2.9 precisa caracterizar el modelo conceptual del sistema sobre el cual se va a evaluar la técnica de modulación M-QAM, en el caso de la investigación es un modelo de red convergente OFDM-RoF, con la adición de una migración del estándar XG-PON a XGS-PON; por tanto, es pertinente caracterizar los bloques que harán parte del modelo conceptual. El sistema general comprende 3 aspectos principales, como: una red de radio sobre fibra (*figura 2.10*), una red de acceso óptica pasiva, y una modulación OOFDM (*figura 2.11*), este último, se propone dentro de la presente investigación con la técnica IM-DD, para una modulación en intensidad EML (*Externally Modulated Laser, Láser Modulado Externamente*), con un láser CW (*Continue Wave, Onda continua*) y un modulador MZM, debido a que es una de las técnicas más básicas de transmisión de señales de radio sobre fibra óptica.

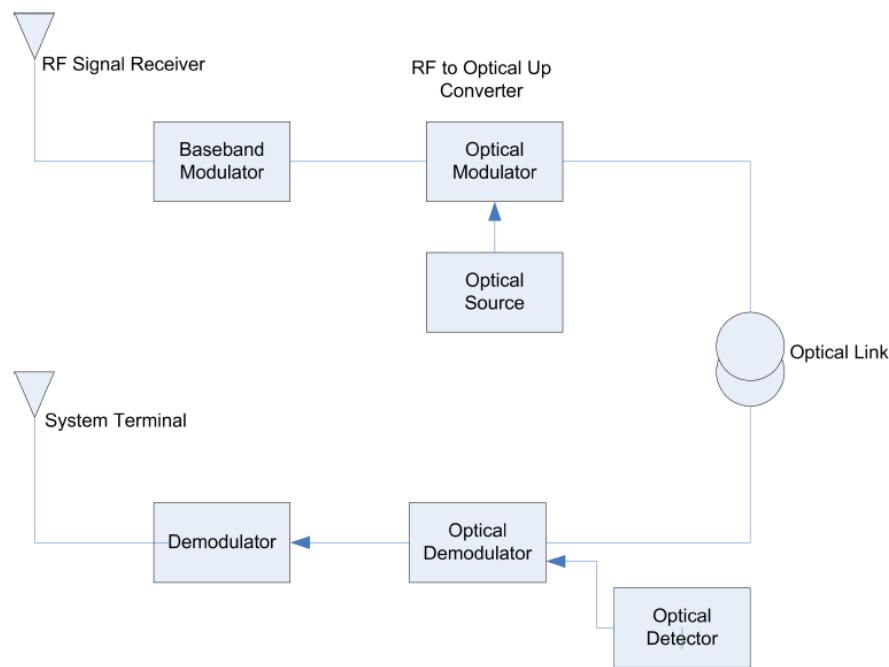
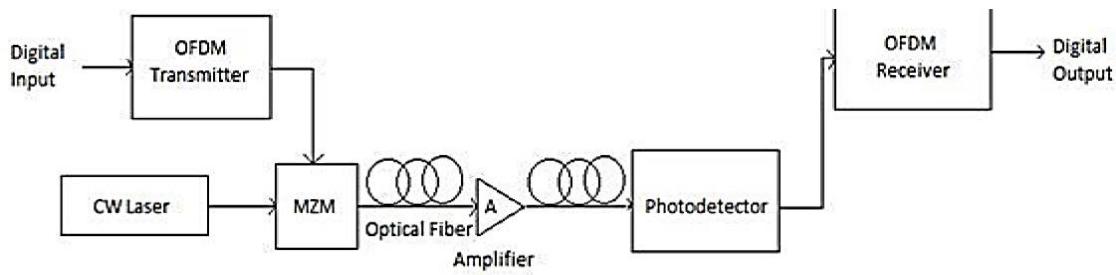


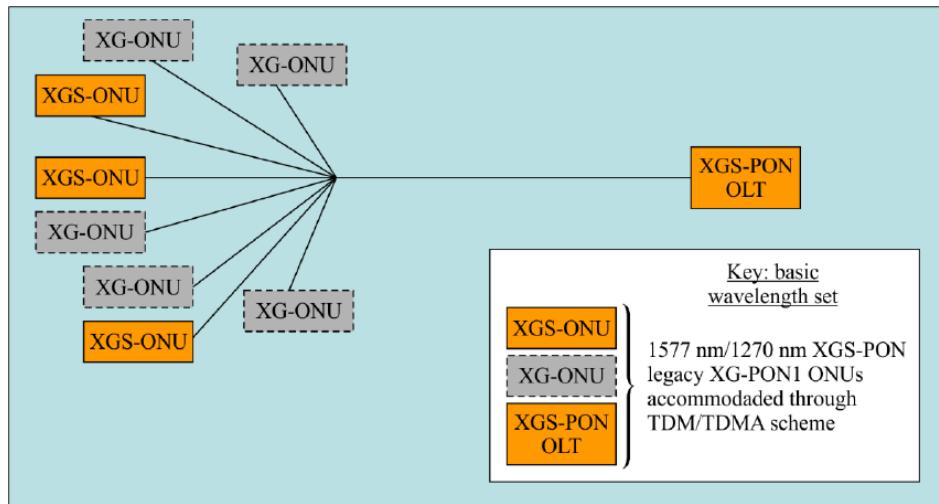
Figura 2.10 – Escenario en bloques general RoF Digital [50].

En el capítulo 1, se precisó que la modulación externa presenta un mejor desempeño frente a la modulación directa, en cuanto a: mejor desempeño en el ancho de banda para frecuencias superiores a 5 GHz, velocidades de transmisión más altas y corrige problemas de distorsión respecto de la modulación directa. Según [1], se recomienda el uso de EML para velocidades entre 0.8 Gbps y 40 Gbps, debido a que se hace un mejor control del chirp y un buen comportamiento respecto de fibras de dispersión positivas como negativas. La figura 2.11 representa el escenario general para un sistema OFDM-RoF con modulación externa.



*Figura 2.11 – Escenario RoF con modulación externa [45].*

Ahora bien, la investigación busca evaluar la técnica de modulación M-QAM en el enlace descendente (OLT-ONT) para una infraestructura de red convergente OFDM-RoF (*a nivel de simulación*); dicha evaluación se realiza en dos escenarios principales de simulación, como lo son: un sistema XG-PON, con un enlace de bajada de 2.5 Gbps, y un sistema XGS-PON, con un enlace de bajada de 10 Gbps. Por su parte, la ITU plantea un escenario de migración para las redes PON manteniendo la interoperabilidad con los estándares anteriores y utilizando en lo posible la misma ODN, así, se plantea la migración de XG-PON a XGS-PON mediante el cambio de la OLT, que permite soportar las velocidades simétricas de XGS-PON. La figura 2.12 representa un escenario de coexistencia de XG-PON y XGS-PON según la recomendación ITU-T G.9807.1.

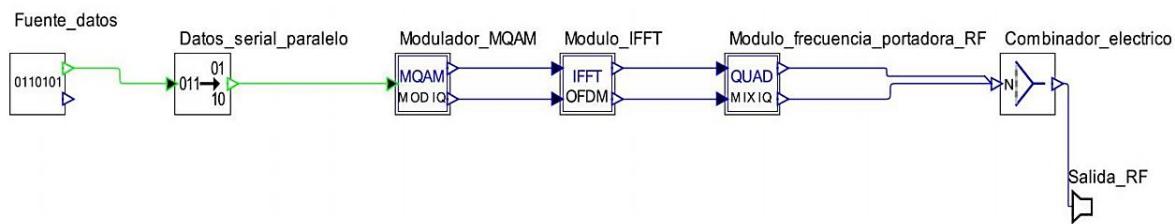


*Figura 2.12 – Coexistencia de XG-PON y XGS-PON [26].*

A continuación, se presenta una caracterización del modelo de red para una infraestructura de red convergente OFDM-RoF de tipo NG-PON1; se tienen en cuenta los componentes generales de un sistema de telecomunicaciones: transmisor, canal, receptor. También, se tienen en cuenta los modelos de referencia que presenta la herramienta OptSim para la tecnología RoF.

### - Transmisor OFDM-RoF (OLT)

El transmisor consiste de dos partes principales que incluyen el subsistema transmisor RF-OFDM y el subsistema convertidor RTO (*RF To Optical, RF A Óptico*). El subsistema transmisor RF-OFDM se propone como sigue: generar una señal binaria pseudoaleatoria de 2.5 Gbps (*escenario de simulación XG-PON*) o de 10 Gbps (*escenario de simulación XGS-PON*) en el sentido de línea descendente (*OLT – ONT*); los datos pasan por un módulo serial a paralelo, en seguida, son tratados mediante modulación M-QAM para generar los símbolos dentro de la constelación “*I/Q*”; se modula a una nueva frecuencia mediante la IFFT para formar el símbolo OFDM; se introduce el prefijo cíclico CP; y finalmente, se modula la señal OFDM de banda base a la frecuencia portadora de RF. La figura 2.13 representa un modelo de referencia para un transmisor RF-OFDM en la herramienta OptSim, el cual se implementa en la presente investigación con algunas adaptaciones.



*Figura 2.13 – Transmisor RF-OFDM en OptSim [40].*

En seguida se tiene el subsistema convertidor RTO, el cual realiza la conversión eléctrica a óptica de una señal OFDM mediante un modulador óptico; se propone la utilización de modulación externa, que implementa una fuente de luz láser CW y un modulador óptico MZM, como se expresó en la figura 2.11. Aunque la técnica de modulación externa requiere un modulador externo además de la fuente de luz, la señal óptica modulada será de mayor calidad, porque se evitan las imperfecciones intrínsecas de la fuente de luz [74]. Por su parte, la recomendación ITU-T G.987.2 define ciertas características para una implementación en el nivel físico de la tecnología XG-PON, así: una potencia mínima de transmisión de 2 dBm en el sentido de línea hacia el destino utilizando modulación EML; una sensibilidad mínima en el receptor de -28 dBm, perdidas de fibra óptica en la ODN por conectores de 1 dB, y unas pérdidas máximas de 29 dB [23]. Los anteriores valores son referencia para la presente investigación.

### - Red de Distribución Óptica (ODN) para OFDM-RoF

El diseño para la ODN se realiza en base a una red de acceso FTTH con una arquitectura tipo XG-PON, es decir, se realiza un tendido de fibra óptica desde la OLT hasta la ONT. Los parámetros de diseño a tener en cuenta, son: la longitud y el tipo de fibra óptica. Teniendo en cuenta que los objetivos planteados para la presente investigación se basan en la implementación de una infraestructura de red convergente OFDM-RoF para las dos versiones de NG-PON1; fue necesario una investigación minuciosa respecto de la distancia máxima alcanzada para este tipo

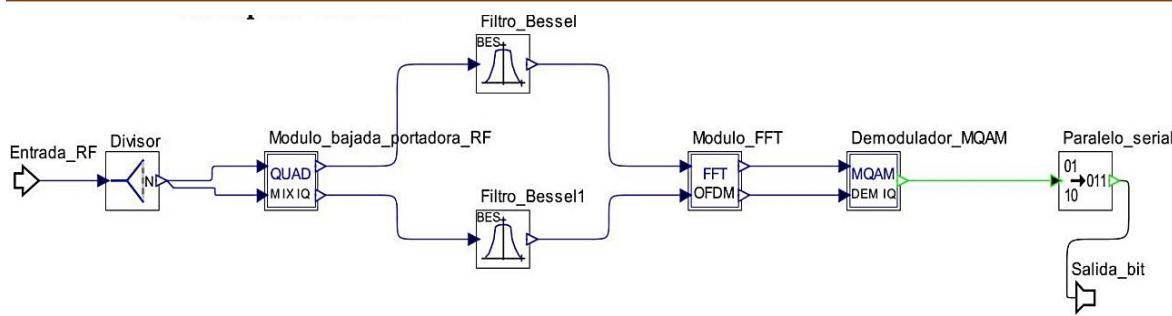
de red convergente, con fin de obtener una BER igual o menor a 10E-3, lo cual es una probabilidad de error de bit aceptable para sistemas de radiotelefonía celular, según lo recomendado por [75]. En este contexto se tienen en cuenta dos recomendaciones importantes, la primera es que, la recomendación ITU-T G.987.1 define un alcance máximo de 20 km de longitud de fibra óptica sin la utilización de amplificador óptico, implementando una fibra monomodo que se rige bajo la recomendación ITU-T G.652 (*fibra monomodo SSMF-28e*) [76], con efectos lineales de atenuación (0.2 dB/Km), y de dispersión cromática (17 ps/nm.Km). Segundo, la distancia máxima alcanzada para un sistema OFDM-RoF es dependiente de la velocidad de transmisión de datos, el ruido, y atenuación en cada uno de los componentes, así como de los efectos lineales y no lineales para el canal óptico. Según [1], para sistemas DWDM, la distancia máxima alcanzada depende de la atenuación y dispersión intrínseca en la fibra óptica, sin embargo, a una velocidad de transmisión de 2.5 Gbps (XG-PON), la atenuación es la que limita en gran medida la distancia máxima alcanzada, mientras que para sistemas a 10 Gbps (XGS-PON), la dispersión cromática es la que limita la distancia máxima alcanzada.

Por lo anterior, para la presente investigación se propone utilizar un contexto metodológico, con el cual, obtener la distancia máxima alcanzada en el modelo de red convergente en cuestionamiento. Así, se plantea una fibra de última milla igual 1.6 km, seguidamente, se evalúa el sistema con una longitud de fibra ODN inicial de 1 km, con variaciones de 1 km, hasta obtener la distancia en la cual se obtenga un factor de calidad igual o superior a 9.8 dB, o lo que es lo mismo, una BER igual a 10E-3 para la señal de radio, correspondiente al peor caso a considerar.

#### **- Receptor RoF (OLT)**

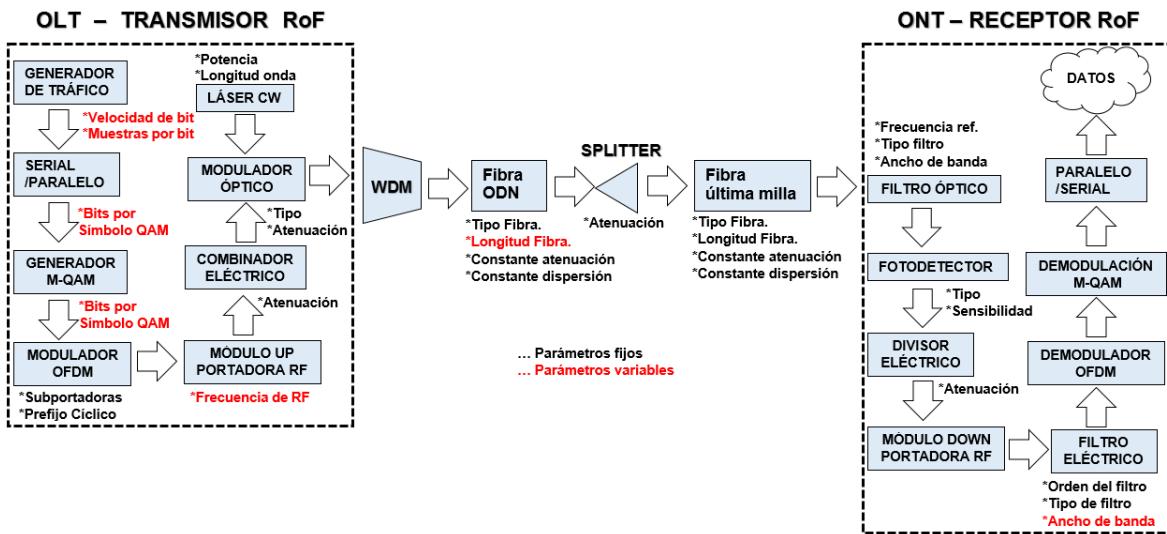
El bloque receptor comprende dos partes principales, como: un convertidor de óptico a eléctrico y un receptor RF-OFDM. La señal óptica al llegar al receptor se encuentra con un filtro pasa banda centrado en la frecuencia de la portadora RF, con el propósito de eliminar el ruido que adicione la fibra durante el recorrido; seguidamente, se tiene un módulo fotodetector tipo PIN, que según como se estudió en el capítulo 1, detecta las variaciones de potencia óptica del pulso y la transforma en corriente eléctrica.

Después que la señal óptica sea convertida a eléctrica y que pase por el filtro pasa banda, es hora de la demodulación RF-OFDM (Ver figura 2.14). El proceso es como sigue: se baja la frecuencia de portadora RF a la frecuencia de banda base; seguidamente, la señal IQ es filtrada con el propósito de eliminar frecuencias indeseadas, luego, se retira el prefijo CP; se pasa por un bloque de transformada FFT; así mismo, todas las salidas serán decodificadas en algún formato M-QAM; finalmente, un bloque convertidor de paralelo a serial donde se obtiene la información enviada previamente. La figura 2.14 representa un modelo de referencia para un receptor RF-OFDM en la herramienta OptSim, el cual se implementa en la presente investigación con algunas adaptaciones.



*Figura 2.14 – Receptor OFDM [40].*

De acuerdo con la caracterización estudiada para el sistema a simular, a nivel conceptual y mediante referencias dentro de la herramienta OptSim, se presenta en la figura 2.15 el modelo conceptual general de la red OFDM-RoF de tipo NG-PON1 a nivel físico en el enlace de bajada, mediante un diagrama en bloques.



*Figura 2.15 – Modelo conceptual general.*

En la tabla 2.3 se presenta un resumen de las características y parámetros generales que se proponen dentro del modelo de red convergente OFDM-RoF de tipo XG-PON; más adelante se presenta una tabla similar, en la cual se evidencian los principales parámetros que se modificaron para el modelo de red convergente de tipo XGS-PON.

PARAMETRO	VALOR
Velocidad Tx datos	2.5 Gbps
Frecuencia portadora RF	2.5 GHz
Formatos de Modulación	4-QAM, 8-QAM 16-QAM, 64-QAM.
Subportadoras IFFT-OFDM	8
Prefijo cíclico	0.25 GHz
Retardo	0
Frecuencia del Láser CW	193.41449 THz (Onda continua)
Potencia del Láser CW	0 dBm
Longitud de onda del láser	1550 nm
Modulador óptico	Modulador LiNb-MZM
Fibra Óptica	ITU-T G.652 (SSMF-28e)
Fotodetector	Tipo PIN
Longitud de onda fotodetector	1550 nm
Filtro eléctrico receptor 1 y 2	Filtro Bessel con 7 número de polos
Filtro Óptico	Filtro raíz cuadrada coseno alzado con un factor de roll-off = 0.5.

*Tabla 2.3 – Configuración de parámetros globales.*

Con relación al modelo conceptual general de la figura 2.15, se observa un dispositivo multiplexor WDM y un divisor óptico pasivo, lo cual indicaría la implementación de varios transmisores RoF para varias estaciones base BS, sin embargo, el objetivo de la presente investigación es el análisis de desempeño de la técnica de modulación M-QAM para un throughput puro de 2.5 Gbps (*XG-PON*) y de 10 Gbps (*XGS-PON*) en el enlace de bajada, por tanto, se mantienen los módulos a manera de representación pero, la implementación de los escenarios de simulación dentro de la herramienta Optsim comprende un sistema RoF con un transmisor ubicado en la oficina central que envía datos directamente a una estación base ubicada en la ONT.

Es importante resaltar que la arquitectura de red está basada en las características de los estándares definidos para las redes XGS-PON, sin embargo, debido a algunas limitaciones con respecto a la implementación de enlaces bidireccionales que presenta la herramienta de simulación; sólo se considera el análisis para el enlace descendente.

### **2.3.2. Métricas y casos de estudio**

Se va a evaluar la técnica de modulación M-QAM dentro de un sistema de comunicaciones híbrido RoF a velocidades de 2.5 Gbps y 10 Gbps en el enlace de bajada, por tanto, es preciso determinar las métricas con las cuales se analiza el desempeño de la técnica de modulación M-QAM dentro del modelo de red descrito en la sección 2.3.1. Con el propósito de realizar un monitoreo dentro de la infraestructura de red propuesta, es preciso utilizar los parámetros de monitoreo

óptico OPM, dado que permiten una identificación oportuna del lugar y causa de las fallas dentro del modelo de red. Estos parámetros permiten analizar las degradaciones de la señal óptica generadas por los efectos lineales y no lineales presentes en la fibra óptica, entre estos efectos, se encuentra la dispersión cromática, la cual debe ser tratada de manera eficaz para recuperar adecuadamente la señal óptica en el receptor.

De acuerdo con la recomendación ITU-T G.697, se definen parámetros de monitoreo óptico, como: factor Q, BER, OSNR, entre otros. Por lo tanto, para la presente investigación, se propone la observación y análisis de las constelaciones M-QAM en el receptor, también, los diagramas de ojo para cada nivel de modulación M-QAM, como dos parámetros esenciales en el momento de realizar un análisis de desempeño de una técnica de modulación sobre un sistema de comunicaciones; también, es pertinente revisar parámetros como la BER, ya que es el parámetro más utilizado para observar la degradación que sufren los datos dentro de un sistema de comunicaciones, y es sensible a las fallas que afectan la calidad del servicio QoS; así mismo, el factor Q y la potencia eléctrica en recepción, son otros parámetros importantes a tener presente para la investigación. En cuanto al monitoreo a nivel físico de calidad de la señal en un medio óptico, se tienen en cuenta la potencia de la señal óptica en recepción y la OSNR. Las medidas descritas anteriormente buscan un análisis completo y preciso, así como también, conclusiones acertadas para el objetivo general de la investigación.

#### - Factor de calidad Q

Es la relación señal a ruido eléctrica ESNR (*Electrical Signal Noise Ratio, Relación Señal a Ruido Eléctrico*) medida en el receptor para el dominio eléctrico en términos de unidades logarítmicas. Así, define completamente la calidad de la señal en el receptor, debido a que se tienen en cuenta los efectos lineales y no lineales del medio óptico, así como, ruido y filtrado de la señal. El factor de calidad Q, se encuentra determinado a nivel estadístico, por las medias y desviaciones típicas de los niveles '1' y '0', como se aprecia en las ecuaciones 2.3 y 2.4.

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad \text{Ecuación (2.3)}$$

$$Q(\text{decibelios}) = 20 \log_{10} Q(\text{lineal}) \quad \text{Ecuación (2.4)}$$

#### - Bit Error Rate (BER)

Con el propósito de analizar el desempeño de una red, desde el transmisor hasta el receptor, es preciso determinar la relación que existe entre el número de bits detectados erróneamente, frente al número total de bits transmitidos, lo cual se conoce como BER; es decir, se define como la probabilidad de recibir erróneamente

un bit transmitido. Para transmisión de señales de radiotelefonía celular, se debe tener una BER mínima aceptable de 10E-3, así mismo, los valores aceptables de BER para un enlace óptico funcional, están alrededor de 10E-12, según lo recomendado en [75].

### - Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR)

Es la relación de la energía (o potencia) de la señal con respecto a la energía (o potencia) de ruido en el canal óptico. La OSNR es una relación que determina la calidad de la señal medida del lado del receptor, respecto del ruido introducido en el medio óptico, donde se presentan múltiples atenuaciones. La OSNR, puede calcularse de acuerdo con la ecuación 2.5.

$$OSNR = 10\log\left(\frac{P_i}{N_i}\right) + 10\log\left(\frac{B_m}{B_r}\right) \quad \text{Ecuación (2.5)}$$

Donde: *P<sub>i</sub>*: Potencia óptica de la señal.

*B<sub>m</sub>*: Ancho de banda.

*N<sub>i</sub>*: Valor promedio potencia de ruido medido en el ancho de banda.

*B<sub>r</sub>*: Ancho de banda óptico utilizado para el transporte de la señal sobre el enlace óptico.

### - Error Vector Measurement (EVM)

La magnitud del vector de error, medida en el transmisor o receptor, busca evaluar la calidad de determinada señal que ha sido modulada con alguna técnica de modulación multinivel, tales como, M-QAM y M-PSK. Para calcular la EVM se utilizan fasores en el plano complejo I-Q, así, la EVM es un escalar que ilustra la diferencia entre el símbolo ideal de referencia (vector con magnitud y sentido) en el diagrama de constelación, y el vector medido real del símbolo recibido, en recepción [40]. La figura 2.16 ilustra la representación gráfica de la EVM.

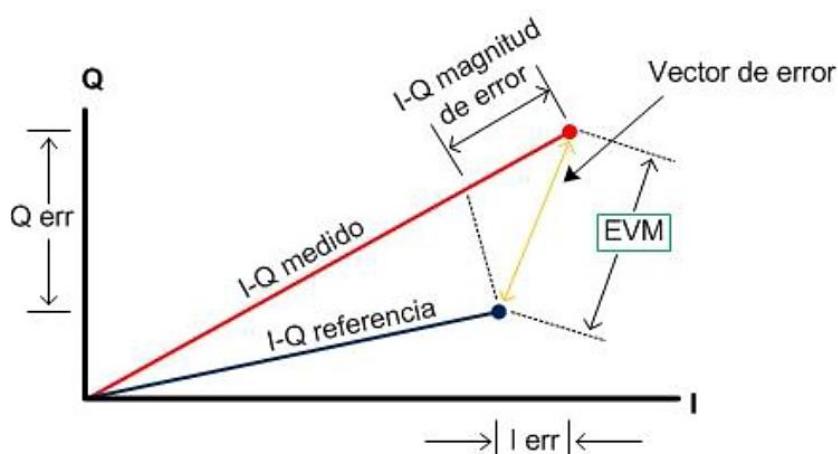


Figura 2.16 – Representación gráfica de EVM [40].

En el contexto de este trabajo de grado, se utiliza la EVM para calcular la BER, debido a que conceptualmente se definió un modelo de red convergente con modulación en intensidad y detección directa, para el sistema OFDM-RoF, lo cual indica que el sistema es no coherente, es decir, no existe sincronización entre el transmisor y el receptor, por tanto, la señal en recepción presenta diferencias de amplitud, y corrimientos de fase, además del ruido presente en todo el sistema. Lo anterior, causa errores en la medición de la *BER*. Para el presente trabajo de investigación se utiliza el valor del vector del símbolo ideal, como el medido en el diagrama de constelación back-to-back, y el valor del símbolo real se obtiene en el receptor, después de haber pasado por el canal óptico.

De acuerdo con [1], es posible obtener la BER en función de la SNR para un modelo de red que utiliza la técnica de modulación M-QAM como se describe en la ecuación 2.6.

$$BER = \frac{2 * (1 - \frac{1}{\sqrt{M}}) * erfc(\sqrt{3 * \frac{SNR[Lineal]}{2 * (M - 1)}})}{\log_2(M)}$$

Ecuación (2.6)

Así mismo, es posible obtener una aproximación coherente de la SNR en función de la EVM, como se describe en la ecuación 2.7.

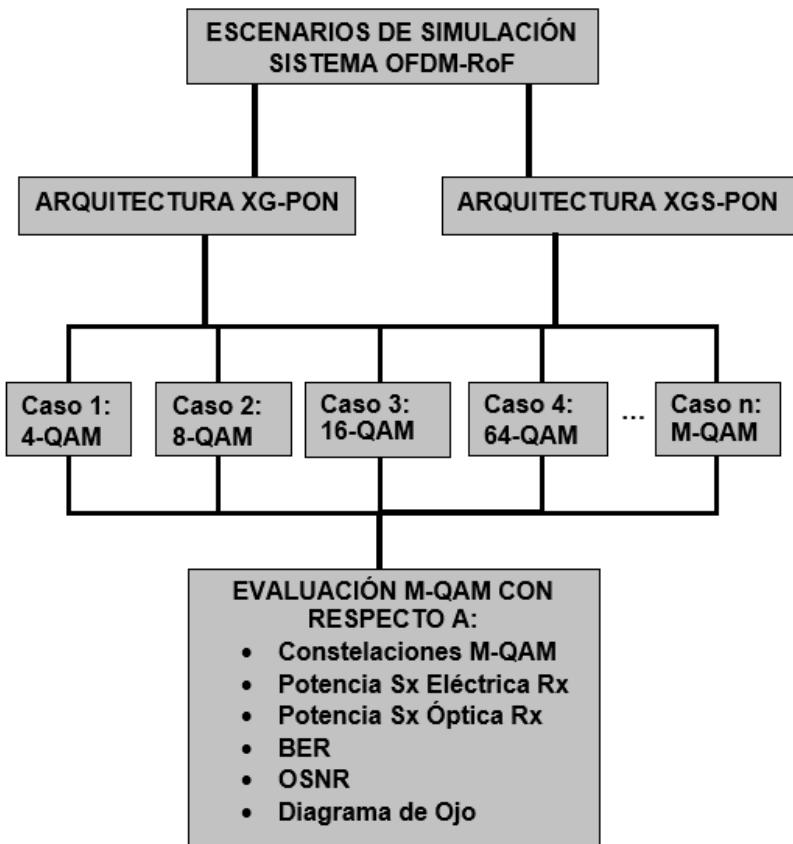
$$SNR[dB] = -20 \log\left(\frac{EVM}{100}\right) = 10 \log(SNR[Lineal])$$

Ecuación (2.7)

Las anteriores ecuaciones, fueron de total utilidad para el proceso correcto del cálculo de la BER. Así, el proceso metodológico a seguir dentro de la herramienta Optsim, es medir la EVM en el receptor del modelo de red OFDM-RoF/XG-PON, posteriormente y con la ayuda de un archivo en Excel, se calcula el resultado de las ecuaciones 2.6 y 2.7, para determinado orden de modulación, dentro de la técnica de modulación M-QAM.

Ahora bien, se tienen dos escenarios de simulación, los cuales son un modelo de red convergente OFDM-RoF/XG-PON y un modelo de red convergente OFDM-RoF de tipo XGS-PON, dentro de los cuales se evalúa la técnica de modulación M-QAM partiendo de las métricas propuestas; así, se proponen cuatro casos de estudio iniciales para cada escenario de simulación, que difieren en el grado de modulación M-QAM, como: 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM y 64-QAM, con el fin de analizar la incidencia del esquema de modulación dentro del modelo de red, a medida que se aumenta tanto el orden de modulación como la velocidad de transmisión de datos, es decir, la pregunta es: ¿Cuál es la afectación en los datos, que produce un esquema de modulación M-QAM a diferentes niveles, en dado caso de una migración para infraestructura de red convergente OFDM-RoF/XG-PON a OFDM-RoF/XGS-PON? La figura 2.17 representa el escenario general de los casos

de estudio planteados dentro de la presente investigación con el propósito de responder al objetivo general del proyecto.



*Figura 2.17 – Escenarios de simulación, casos de estudio y métricas.*

*Nota de autor:*

*Los autores sienten que con la realización del presente capítulo se cumple con dos de los objetivos específicos de la investigación, en los cuales se plantea la caracterización de un modelo de red convergente OFDM-RoF de tipo XG-PON, así como, la caracterización de un modelo de red convergente de tipo XGS-PON, también, se define un contexto razonable y sistemático sobre el cual abordar el trabajo de investigación, debido a que se presentó un análisis teórico sobre las principales herramientas de simulación y las metodologías de investigación y simulación (para su comparación y posterior elección); así como también, las métricas de estudio sobre las cuales se va a dar solución a la pregunta de investigación. La importancia del presente capítulo se fundamenta en la organización del presente trabajo de grado, y en la obtención de objetivos claros y específicos.*

## **CAPÍTULO 3.**

### **DISEÑO Y ANÁLISIS DE ARQUITECTURAS CONVERGENTES RoF-PON**

Con el desarrollo del anterior capítulo, se definió la herramienta de simulación OptSim para el proyecto debido a sus ventajas respecto de otras herramientas de simulación, acto seguido, se definieron las metodologías de investigación y de simulación que corresponden a la base principal del proyecto, así mismo, se aplicaron tales metodologías para un desarrollo sistemático de la investigación, y también para el diseño y caracterización del modelo de red, con sus respectivos escenarios de simulación, métricas y casos de estudio. A continuación, se procede a analizar los datos de los resultados de las pruebas que permitan evaluar el efecto de la técnica de modulación M-QAM para una infraestructura de red convergente OFDM-RoF/XG-PON a OFDM-RoF/XGS-PON.

En este capítulo se realiza el diseño de los escenarios de simulación en la herramienta Optsim para los modelos de red convergente OFDM-RoF/XG-PON y OFDM-RoF/XGS-PON, con el propósito de iniciar la evaluación de la técnica de modulación M-QAM, con sus respectivos parámetros de diseño. Después, se ejecuta la simulación para comprobar el funcionamiento del sistema, en caso de fallas, se rediseña el escenario de simulación y se verifican los parámetros preestablecidos; en caso de éxito del sistema, se procede a evaluar la técnica M-QAM sobre el modelo de red con las métricas y casos de estudio propuestos. Así, se diseña el escenario de simulación OFDM-RoF/XG-PON para analizar la incidencia en la calidad de los datos cuando se incrementa el orden de modulación (4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM), a partir de la observación en el receptor de las constelaciones M-QAM, diagrama de ojo, BER, y demás. Después, se realiza el escenario de simulación OFDM-RoF/XGS-PON y también, se analiza la degradación de los datos a media que se aumenta el orden de modulación M-QAM. Este capítulo busca ofrecer datos y documentación acertados, para determinar el efecto que tiene la técnica de modulación M-QAM, en el momento de una posible migración de la infraestructura a nivel físico de OFDM-RoF/XG-PON a OFDM-RoF/XGS-PON.

#### **3.1. ESCENARIO DE SIMULACIÓN XG-PON**

A continuación, se presentan los parámetros técnicos de cada bloque para este escenario de simulación dentro de la herramienta OptSim, y se cierra con el modelo de red propuesto, en adición, se presenta un análisis respecto de la distancia máxima alcanzada para el modelo específico de red OFDM-RoF/XG-PON, mediante una serie de simulaciones consecutivas. También, se presentan los resultados obtenidos, a partir de tablas, gráficas e ilustraciones de las métricas propuestas, para 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM y 64-QAM, es decir, se analiza el efecto

que tiene el aumento del orden de modulación M-QAM para este escenario de simulación.

- **Distancia máxima alcanzada**

Este ítem, es uno de los más importantes respecto del diseño del modelo de red convergente OFDM-RoF/XG-PON, por tanto, es pertinente encontrar la distancia a la cual se obtuviera un sistema de telecomunicaciones funcional, a partir de las temáticas propuestas. En un contexto metodológico, se plantea una longitud de fibra óptica para última milla igual a 1.6 km aproximadamente, posteriormente, se varía la longitud de la fibra óptica de distribución u ODN, inicial de 1 Km, y en adelante, con pasos de 1 Km. Lo anterior, con el propósito de encontrar la distancia máxima a la cual, se obtenga la BER mínima aceptable, alrededor de 10E-3, para sistemas de radiodifusión según lo recomendado en [75]. Finalmente, se utiliza esta distancia máxima encontrada para la evaluación de la técnica de modulación 4-QAM en el modelo de red convergente OFDM-RoF/XG-PON. La tabla 3.1 presenta las distintas simulaciones en el sistema Optsim, junto con la distancia total del enlace, y el valor de BER obtenido.

D[Km]	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lin]	BER (con SNR [lin])
<b>2.6</b>	9.8557	20.12625049	102.9496914	1.71884E-24
<b>3.6</b>	9.8557	20.12625049	102.9496914	1.71884E-24
<b>4.6</b>	9.7603	20.21073667	104.9720471	6.19355E-25
<b>5.6</b>	9.8557	20.12625049	102.9496914	1.71884E-24
<b>6.6</b>	9.7603	20.21073667	104.9720471	6.19355E-25
<b>7.6</b>	9.7603	20.21073667	104.9720471	6.19355E-25
<b>8.6</b>	10.9054	19.24716801	84.08466544	2.37017E-20
<b>9.6</b>	10.5237	19.55663082	90.29487097	1.02592E-21
<b>10.6</b>	9.6648	20.29614257	107.0567999	2.16296E-25
<b>11.6</b>	10.5237	19.55663082	90.29487097	1.02592E-21
<b>12.6</b>	19.5891	14.15971033	26.05979731	1.65502E-07
<b>12.7</b>	22.1656	13.08641017	20.35358975	3.21861E-06
<b>12.8</b>	23.4061	12.61341888	18.25332085	9.66942E-06
<b>12.9</b>	26.078	11.67451438	14.70453983	6.28716E-05
<b>13</b>	27.7957	11.12044769	12.94329259	0.000160535

*Tabla 3.1 – Distancia máxima alcanzada 4-QAM/XG-PON.*

Para la evaluación de la técnica de modulación 4-QAM en el modelo de red convergente OFDM-RoF/XG-PON, se toma la distancia máxima igual a 13 Km, con una longitud de última milla de 1.6 Km, y una longitud de ODN igual a 11.4 Km. Por otra parte, se describe la configuración del modelo de red propuesto para el modelo de red convergente OFDM-RoF/XG-PON, como sigue:

- Bloque “*Data Source*”: genera una señal binaria pseudoaleatoria a una velocidad de transmisión de datos de 2.5 Gbps para un periodo de bit igual a 0.4 ns, con 256 muestras por bit, a un tiempo total de simulación igual a 409.6 ns, para un total de 1024 bits transmitidos.
- Bloque “*serial\_paralelo*”: convierte la secuencia de datos serial, a un flujo de datos en paralelo con K bits por símbolo a la salida, donde K es un entero dependiente del orden de modulación M-QAM. La velocidad de baud a la salida es igual a la velocidad de transmisión de datos.
- Bloque “*M-QAM Modulator Inphase-InQuadrature*”: modula los bits en paralelo en símbolos M-QAM, generando una señal modulada en fase y en cuadratura, con una amplitud igual a 1 [a.u]; la velocidad de baud es igual a la velocidad de transmisión de datos dividido por el número de bits por símbolo para determinado orden de modulación. Para la simulación, se consideran distintos niveles de modulación M-QAM.
- Bloque “*IFFT OFDM Inphase-InQuadrature*”: calcula la IFFT sobre la señal M-QAM de entrada y obtiene el símbolo OFDM. También, se asignan 8 subportadoras, un valor de prefijo cíclico de 0.25 GHz, y una amplitud del símbolo OFDM en fase y en cuadratura igual a 1 [a.u], los cuales son parámetros preestablecidos para la herramienta Optsim dentro del modelo de referencia visto en la figura 2.13; cabe señalar que, algunas investigaciones utilizan mayor cantidad subportadoras con el propósito de transportar mayor cantidad de tráfico en paralelo, con la penalidad de un aumento en el ancho de banda.
- Bloque “*Quadrature Mix en fase y en cuadratura 1*”, modula la señal OFDM de banda base a la frecuencia portadora de radiofrecuencia (*pasa banda*); se asignó una frecuencia portadora de 2.5 GHz, definida por defecto dentro del esquema de la figura 2.13 para un transmisor RF-OFDM.
- Bloque “*combinador eléctrico*”, combina el espectro eléctrico de la señal OFDM de entrada en fase y en cuadratura, posteriormente, se obtiene una sola señal eléctrica a la salida a una frecuencia de 2.5 GHz. El parámetro de atenuación a la salida del combinador eléctrico es de 0 dB.
- Modulador de “*Amplitud sin<sup>2</sup>*”, permite simular un modulador en amplitud Mach-Zehnder de tipo seno al cuadrado. Este bloque tiene incorporado un filtro eléctrico para la señal de entrada, cuya función de transferencia está dada por la ecuación 3.1; la señal de salida óptica estará en función del voltaje de entrada con un voltaje pico de 5 voltios; el factor de chirp se asigna por defecto a “0.0”, con unas perdidas en exceso introducidas por el modulador de 3 dB, y una reducción de la potencia promedio debido a la modulación igual a 3 dB.

$$H(f) = \frac{\sin\left(\frac{\pi f}{B_0}\right)}{\frac{\pi f}{B_0}}$$

*Ecuación (3.1)*

Donde  $B_0$  es aproximadamente dos veces el ancho de banda la señal [Hz] y,  $F$  es la frecuencia de corte [Hz].

- Láser CW: es la fuente de luz que modula el espectro eléctrico de la señal OFDM entrante, utilizando un modulador en intensidad Mach-Zehnder. La potencia del láser se define en 0 dBm, centrado en la longitud de onda de 1550 nm, de acuerdo con el plan espectral para la tecnología PON. Aumentar la potencia del láser implicaría penalidades en el consumo de energía por parte del transmisor y un costo superior del láser.
- Filtro “Raíz cuadrada coseno alzado”: filtro óptico pasa banda centrado en la frecuencia de 193.41449 THz con un ancho de banda lateral igual a la mitad del ancho de banda óptico disponible, y un factor de roll-off de 0.5.
- Bloque de fibra óptica: este bloque dentro de OptSim toma en cuenta todas las variaciones estocásticas de las características de la fibra y polarización. Es uno de los bloques más complejos dentro de la herramienta, así, se toman las configuraciones por defecto para una fibra monomodo estándar SMF con atenuación de 0.2 dB/Km, dispersión de 17 ps/nm/km y PMD < 0.1 ps/sqrt(Km); con la diferencia que se calcula la distancia máxima encontrada para determinado orden de modulación M-QAM sobre el modelo de red convergente OFDM-RoF/XG-PON, en base a una serie de simulaciones que pretendían encontrar la distancia máxima a la cual se encontraba la BER mínima aceptable de 10E-3.

En el lado del receptor se describen los siguientes bloques:

- Filtro óptico de coseno alzado: centrado en la frecuencia de 193.41449 THz (1550nm) con un ancho de banda lateral igual a la mitad del ancho de banda óptico disponible, y un factor de roll-off de 0.5, para eliminar frecuencias indeseadas, causadas por las degradaciones que pueda producir el canal óptico.
- Fotodetector tipo PIN: es un tipo de fotodiodo con junturas semiconductoras dopadas con P, intrínsecas y dopadas con N, que presenta una salida eléctrica generada por un proceso de foto detección, con respuesta de 0.8751 A/W. La señal eléctrica está en función de la potencia óptica a la entrada, y de un factor de corriente oscura igual a “0.1 nA” por defecto. Su utilización es muy común, de fácil uso y bajo costo.

- Divisor eléctrico: que separa la señal de RF en dos réplicas, con una atenuación en cada salida de 0 dB.
- Bloque “*Quadrature Mix en fase y en cuadratura 2*”: permite bajar la frecuencia de la señal eléctrica en la portadora de RF (2.5 GHz), a la frecuencia de banda base.
- Filtro eléctrico “*Bessel 1 y 2*”: filtra la señal proveniente del canal óptico, con el propósito de eliminar frecuencias indeseadas. Se configura un filtro pasa bajo, con un ancho de banda igual a 2.5 GHz.
- Demodulador “*FFT OFDM*”, calcula la FFT de la señal OFDM tanto en fase como en cuadratura, para recuperar el símbolo M-QAM.
- Demodulador *M-QAM*, proceso inverso a la modulación en formatos M-QAM para recuperar la secuencia de bits de una señal entrante al bloque, en fase y en cuadratura.
- Bloque “*paralelo\_serial*”, permite restaurar el orden de la información para obtener la secuencia binaria serial.

La figura 3.1, representa el primer escenario de simulación implementado en la herramienta OptSim para un modelo de red convergente OFDM-RoF de tipo XG-PON. Cabe señalar que de acuerdo con lo estudiado en el capítulo 1, en dado caso de una posible migración del estándar XG-PON a XGS-PON, se mantiene en tanto como sea posible la misma ODN, manteniendo la interoperabilidad con el estándar anterior, y por tanto, para XGS-PON se realiza el mismo escenario de simulación de la figura 3.1, con un cambio en la velocidad de transmisión de datos en el sentido de línea descendente igual a 10 Gbps, entre otras configuraciones de los bloques; se comprobó el funcionamiento del mismo y se procede a obtener resultados.

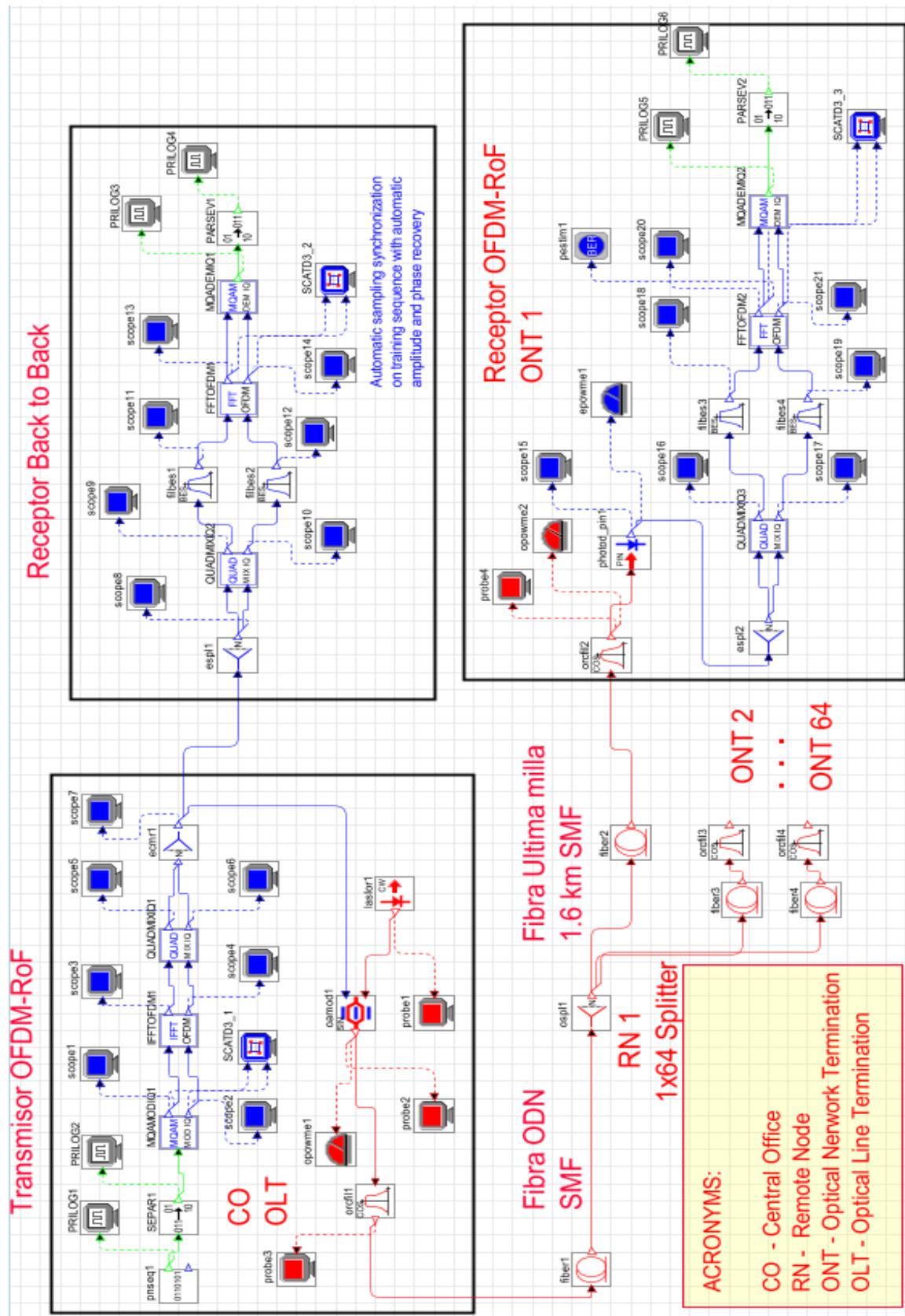


Figura 3.1 – Escenario de simulación OFDM-RoF/XG-PON implementado.

### 3.1.1. SISTEMA OFDM-RoF 4-QAM XG-PON

Es pertinente analizar en primera instancia la red RF-OFDM back-to-back para la modulación de 4-QAM (*2 bits por símbolo*), desde la transmisión hasta la recepción, como se observa en la parte superior de la figura 3.1. Este tipo de análisis busca comprobar el correcto funcionamiento del transmisor y receptor RF-OFDM, también, obtener las condiciones iniciales del modelo de red con respecto a los diferentes parámetros de monitoreo óptico tenidos en cuenta para la presente investigación, tales como, BER, OSNR, EVM, jitter, entre otros. El análisis para la red back-to-back busca resultados para un enlace óptico ideal en el que no se consideran las degradaciones intrínsecas del canal óptico; así, tales mediciones iniciales de las métricas para el sistema back-to-back, serán considerados. La figura 3.2 presenta los datos binarios a ser transmitidos mediante el sistema OFDM-RoF para una velocidad en el enlace descendente de 2.5 Gbps, con una longitud simulada de 1024 bits y, un periodo de bit igual a 0.4 ns.

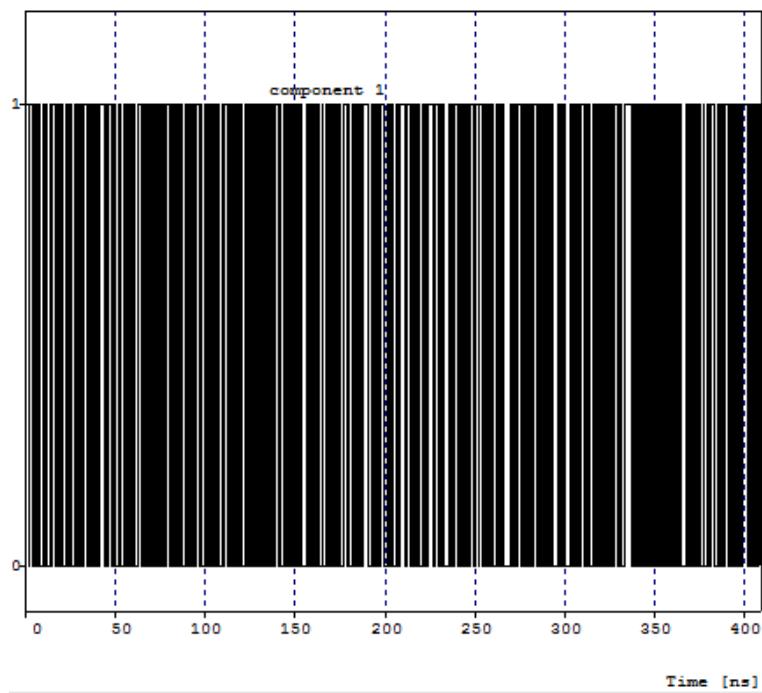
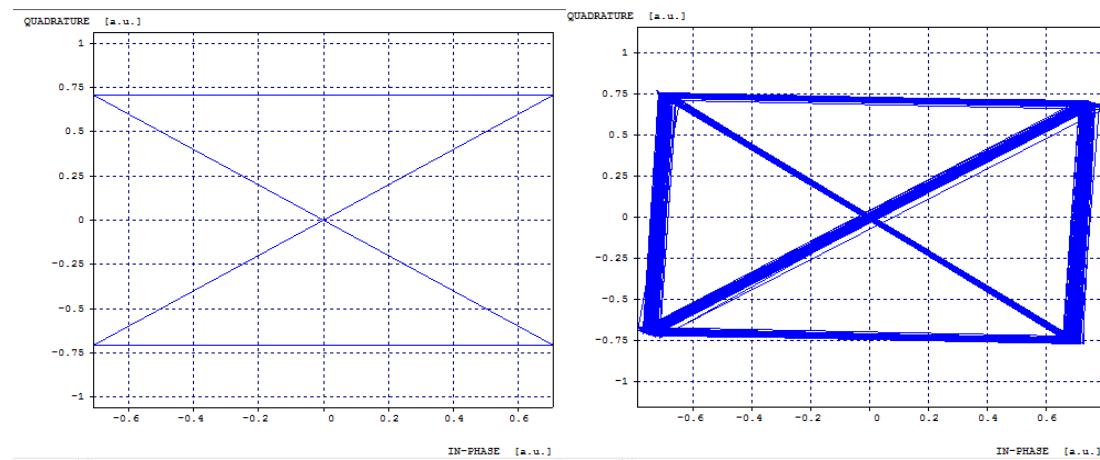


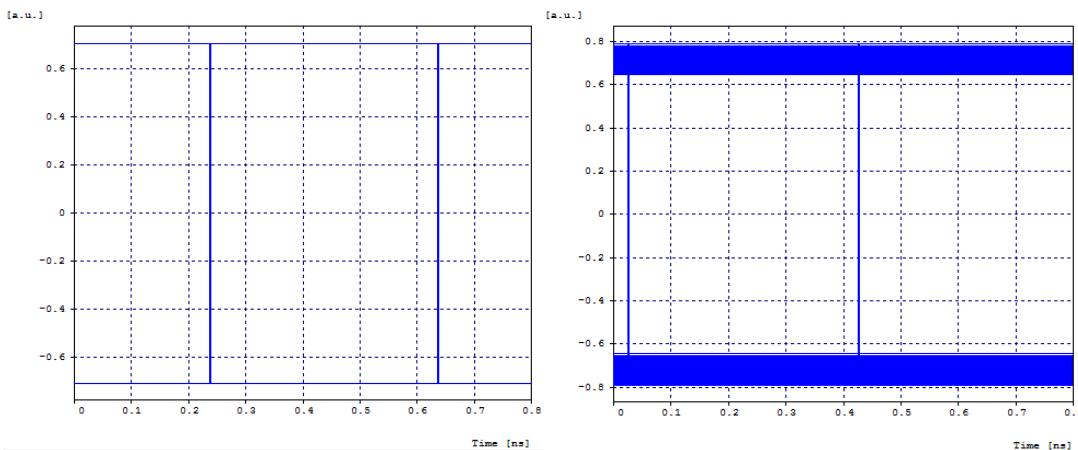
Figura 3.2 – Datos generados.

Las figuras 3.3 (a) y (b) presentan el diagrama de constelación del lado del transmisor y del receptor, con los datos binarios mapeados en 4-QAM para el sistema RF-OFDM back-to-back. La constelación de la figura 3.3 (a), claramente muestra que la señal de entrada eléctrica transmite 2 bits por símbolo, para un total de 4 símbolos equiespaciados.



*Figura 3.3 – a) Diagrama de constelación señal 4-QAM en el transmisor. b) Diagrama constelación señal 4-QAM en el receptor back-to-back.*

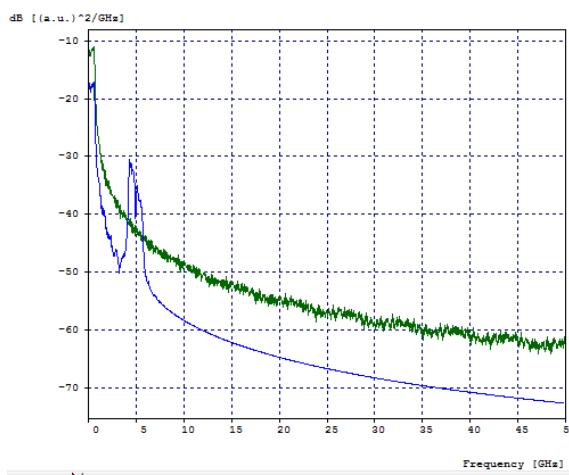
Se observa que los símbolos M-QAM del lado del receptor back-to-back presentan bajo ruido de fase y atenuación, con EVM igual a 17.2124 %, claramente están dispersos respecto del punto de referencia IQ para la modulación 4-QAM, esto es debido al ruido y atenuación que presenta cada componente dentro del sistema back-to-back para la conformación y posterior demodulación del símbolo OFDM, así como también, la cantidad de símbolos simulados y muestreados por la herramienta OptSim; se dice entonces que el error es mínimo, por lo que a través de esto se ilustra que el transmisor funciona correctamente, así mismo, la recepción correcta de los datos por parte del sistema RF-OFDM. El diagrama de ojo para la modulación 4-QAM en el sistema RF-OFDM back-to-back, se observa en la figura 3.4 (a) y (b).



*Figura 3.4 – a) Diagrama de ojo señal ‘I’ 4-QAM en el transmisor. b) Diagrama de ojo señal ‘I’ 4-QAM en el receptor back-to-back.*

De acuerdo con las mediciones correspondientes para los diagramas de ojo presentados en la figura 3.4, se observa que el factor de calidad Q para la señal 4-QAM en fase, presentó una disminución de 13.36 dB aproximadamente, pasando

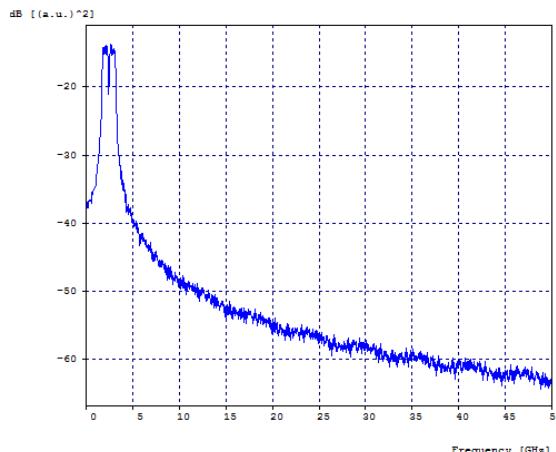
de 40 dB iniciales en el transmisor, a 26.6407 dB para el receptor back-to-back, con un jitter o retardo en el símbolo transmitido de 0.0824 ns; sin embargo, la probabilidad de que exista un error un bit transmitido es igual a 1E-40, con lo cual, es claramente posible una recepción correcta de la información transmitida. Estos datos son valores de referencia para la presente investigación, ya que más adelante, se implementa la tecnología XG-PON y se analiza la calidad de los datos en el receptor RoF, mediante la utilización de la técnica de modulación M-QAM. En adición, los símbolos 4-QAM en banda base son modulados en OFDM mediante la IFFT, con 8 subportadoras ortogonales y la adición de un prefijo cíclico de 0.25 GHz, así, la señal OFDM experimenta baja distorsión y por tanto, no requiere de ecualización. En la figura 3.5 (a) y (b) se ilustra el comportamiento de la señal RF-OFDM en el dominio de la frecuencia para el sistema back-to-back.



*Figura 3.5 – a) Espectro señal “I” OFDM en el transmisor (verde). b) Espectro señal “I” OFDM (azul) en el receptor back-to-back.*

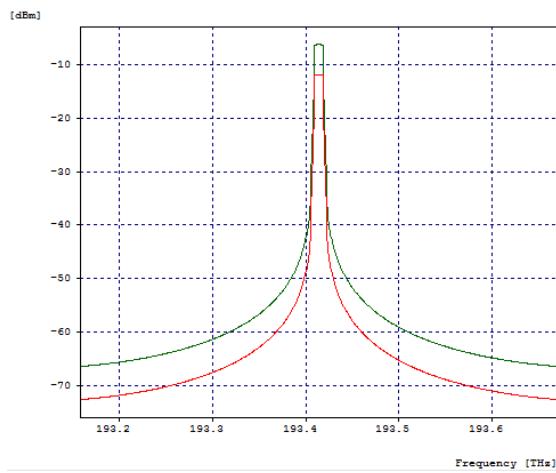
Para el espectro en frecuencia del símbolo OFDM en el transmisor, se mide una potencia pico de -10.8781 dB; también, del lado del receptor back-to-back, la señal OFDM obtenida después de un proceso de filtrado, tiene una potencia pico igual a -17.0335 dB, con lo cual se evidencia una atenuación de 6.1554 dB. Por lo anterior, se dice entonces que la implementación de la técnica OFDM dentro de un sistema de radiofrecuencia, presenta degradaciones de la señal debido a los diferentes componentes que se utilizan para la transmisión y recepción del símbolo OFDM, así como también, introducen ruido en la señal. Para el presente trabajo de grado, y con el fin de evaluar la posible degradación de la señal M-QAM para un modelo físico de red XG-PON, es pertinente tomar como condiciones iniciales, los parámetros de monitoreo óptico, medidos específicamente del lado del receptor back-to-back.

Continuando, la señal OFDM se encuentra en banda base, por lo que debe ser convertida en alta frecuencia antes de entrar al medio óptico, para una frecuencia portadora de 2.5 GHz, con una potencia pico de -13.6267 dB y ocupando un ancho de banda igual a 5 GHz como se observa en la figura 3.6.



*Figura 3.6 – Señal “I” OFDM en la frecuencia portadora RF.*

La señal RF-OFDM es modulada en el dominio óptico, mediante la técnica de modulación externa, la cual es bien conocida para utilizarse en señales de alta frecuencia, con la utilización de un diodo láser de onda continua a una potencia de 0 dBm, centrado en la ventana de 1550 nm (193.41449 THz); y un modulador en amplitud Mach Zehnder. En la figura 3.7 (a) se observa la señal RoF, después de un filtro óptico pasa banda de raíz cuadrada de coseno alzado, centrado en la frecuencia óptica de 193.41449 THz. Como se estudió en el capítulo 1, los sistemas ópticos son eficientes respecto al ancho de banda, llegando al orden de los Terahertz, con multiplexación de longitudes de onda. Para la simulación, se asigna un canal con ancho de banda óptico igual a 10 GHz, lo cual es claramente suficiente para la transmisión de la señal en el dominio óptico.

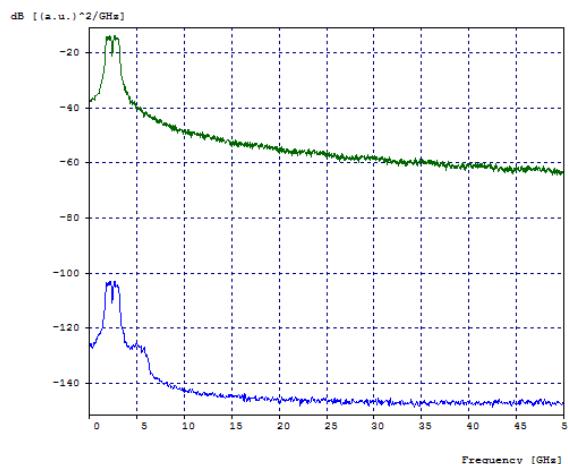


*Figura 3.7 – a) Señal RoF en la OLT (verde). b) Señal RoF en la ONT (rojo).*

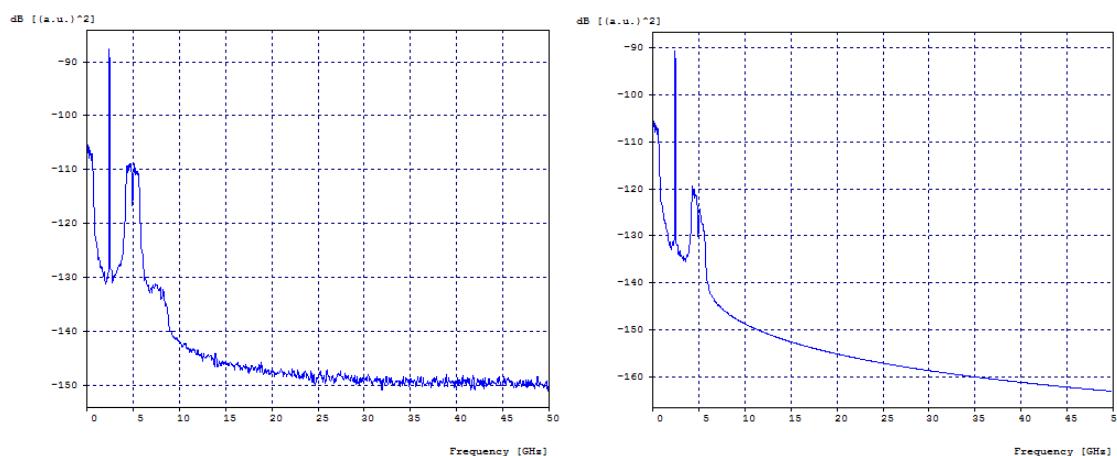
El espectro óptico de la señal antes de entrar a la fibra óptica presenta una potencia igual a -6.0380 dBm, así mismo se obtiene una OSNR de 60.5545 dB. Por su parte, después que la señal RoF sea propagada por los 13 km de longitud de fibra óptica, es filtrada nuevamente en el receptor. La figura 3.7 (b) presenta la señal RoF obtenida en la ONT, en la cual la potencia óptica medida es de -11.6576 dBm, por lo que se evidencia una atenuación aproximadamente de 5.6196 dB, y se

presenta una relación OSNR de 61.1441 dB; tal atenuación que sufre la señal, es debido a la distancia recorrida, las características de la fibra, filtros, moduladores ópticos, y demás componentes que introducen ruido y atenuación en el enlace; sin embargo, la relación señal a ruido óptico apenas se aumentó durante los 13 km de longitud de fibra óptica, es decir, la calidad de la señal en el receptor es claramente superior respecto del ruido presente en el canal óptico.

El espectro de la señal RF-OFDM en la ONT después de la conversión eléctrica a óptica se ilustra en la figura 3.8 (b) (*color azul*), con una potencia pico de -92.3591 dB, así mismo, se presenta la señal RF-OFDM enviada por parte del transmisor (*color verde*); la simulación evidenció una atenuación de 78.7324 dB. En adición, la señal RF-OFDM es bajada de frecuencia de RF a frecuencia de banda base, cuya función se determina por el bloque “QUADMIX\_DOWN”; luego, la señal es filtrada a pasa bajas con un ancho de banda igual a 2.5 GHz; la figura 3.9 (a) y (b) ilustran el espectro de radiofrecuencia para la señal OFDM antes y después del filtro pasa bajas bessel (*número de polos = 7*).

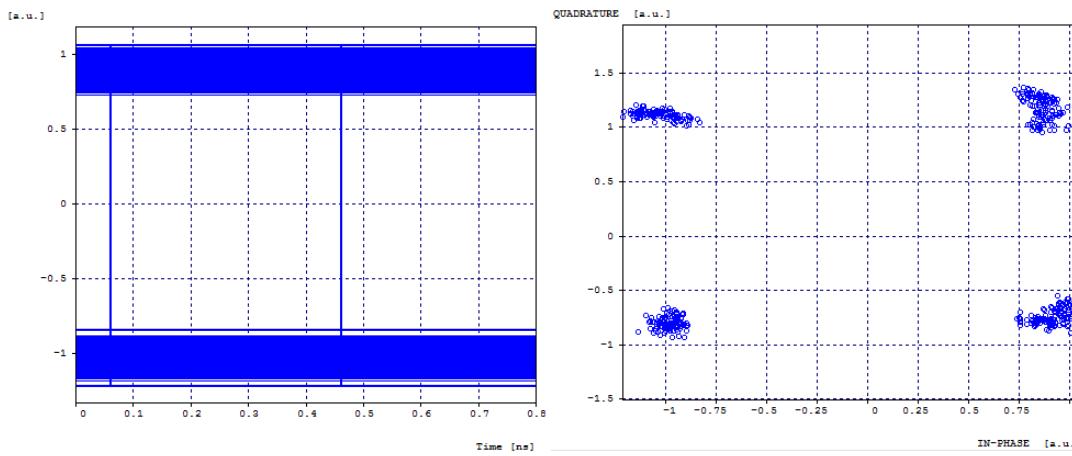


*Figura 3.8 – Señal RF-OFDM a) Transmitida (verde). b) Recibida ONT (azul).*



*Figura 3.9 – Señal “I” OFDM en ONT. a) Antes del filtro. b) Despues del filtro.*

Los resultados de la simulación en el receptor, para la señal OFDM en fase, de acuerdo con la figura 3.9 (b), muestran una potencia pico en el dominio de la frecuencia igual a -98.4517 dB, esto indica que la señal “I” OFDM ha sufrido una atenuación de aproximadamente 87 dB, con respecto a la potencia pico de la señal OFDM en el transmisor. Así mismo, el diagrama de ojo y de constelación, para la modulación 4-QAM en el sistema OFDM-RoF/XG-PON, son analizados en la figura 3.10 (a) y (b). En el diagrama de constelación, se puede observar que los símbolos presentan efectos de ruido de fase, atenuación y un alto ruido eléctrico, esto debido a los efectos de la dispersión cromática en la fibra óptica, así como, la atenuación y el ruido que sufre la señal en cada uno de los componentes del sistema de comunicaciones OFDM-RoF.



*Figura 3.10 – a) Diagrama de ojo señal “I” 4-QAM en el receptor. b) Diagrama de constelación 4-QAM en el receptor.*

Se inicia con el orden de modulación 4-QAM, para lo cual, los datos de la simulación en el sistema Optsim, y de acuerdo a la gráfica 3.10 (a) y (b), se presentó una BER de 1.6E-4 a 13 km de longitud de fibra óptica, lo cual es un valor aceptable en sistemas de radiofrecuencia. Así mismo, el factor de calidad medido es de 11.1 dB, sin embargo, la calidad de la señal respecto del ruido se ha afectado en gran medida, tomando como referencia el factor de calidad en el transmisor (27 dB). A continuación, una tabla a manera de resumen sobre los resultados de la simulación en esta sección.

PARÁMETRO	Valor Tx OLT	Valor Rx ONT.
<b>Potencia señal RF-OFDM eléctrica [dB]</b>	-13.6267	-92.3591
<b>Potencia señal RoF óptica [dBm]</b>	-6.0380	-11.6576
<b>OSNR [dB]</b>	60.55	61.14
<b>BER</b>	1E-40	1.6E-4
<b>Factor Q [dB]</b>	40	11.1
<b>EVM [%]</b>	ideal	27.7957
<b>Apertura de ojo [a.u.]</b>	1.4142	0.8949
<b>Jitter [ns]</b>	0.0	0.0132

*Tabla 3.2 – Resultados modelo de red OFDM-RoF/XG-PON 4-QAM.*

De acuerdo con los resultados de la simulación, es necesario afirmar que es posible una implementación de la técnica de modulación 4-QAM para la infraestructura de red convergente OFDM-RoF/XG-PON en el enlace descendente, alcanzando una distancia máxima de 13 km sin la utilización de amplificadores y compensadores ópticos. Para el sistema evaluado en el mínimo desempeño se obtuvo una BER de 1.6E-4.

### **3.1.2. SISTEMA OFDM-RoF 8-QAM XG-PON**

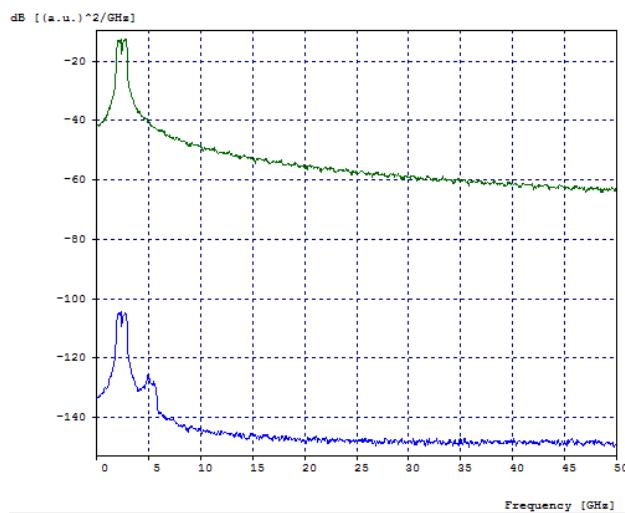
De acuerdo con la ecuación 2.6, se puede observar que el cálculo de la BER depende de la SNR y del orden de modulación M-QAM, por tanto, es necesario realizar el procedimiento para encontrar la distancia máxima alcanzada para una modulación 8-QAM, y después evaluar, tal orden de modulación dentro del modelo de red convergente, como se muestra en la tabla 3.3.

D[Km]	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lin]	BER (con SNR [lin])
<b>2.6</b>	2.6644	31.4880115	1408.643677	1.1485E-133
<b>3.6</b>	2.6499	31.5354103	1424.101781	4.1617E-135
<b>4.6</b>	2.6237	31.62171649	1452.68566	9.0153E-138
<b>5.6</b>	2.7197	31.30957997	1351.941805	2.2165E-128
<b>6.6</b>	2.6958	31.38624662	1376.019733	1.2623E-130
<b>7.6</b>	2.6204	31.63264818	1456.346842	4.1089E-138
<b>8.6</b>	4.3505	27.22921654	528.3499298	1.55317E-51
<b>9.6</b>	4.0477	27.85583366	610.3562083	3.37841E-59
<b>10.6</b>	4.0477	27.85583366	610.3562083	3.37841E-59
<b>11.6</b>	4.7689	26.43163569	439.7071914	3.01807E-43
<b>12.6</b>	7.2965	22.73770826	187.8325378	1.26091E-19
<b>13.6</b>	13.2514	17.55476473	56.94773729	3.37927E-07
<b>14.6</b>	22.0161	13.14519222	20.63094977	0.001274738
<b>15.6</b>	26.6523	11.48530614	14.0776646	0.006078205
<b>16.6</b>	27.4718	11.22225768	13.25030173	0.007434838
<b>17.6</b>	20.5427	13.74684952	23.69654077	0.000622914
<b>18.6</b>	18.382	14.71214476	29.59473643	0.000159746
<b>19.6</b>	20.5427	13.74684952	23.69654077	0.000622914
<b>19.7</b>	20.6743	13.69138372	23.39582543	0.000668037
<b>19.8</b>	20.6515	13.70096797	23.44751361	0.000660052
<b>19.9</b>	21.3524	13.41106607	21.93343272	0.000939517
<b>20</b>	22.1142	13.10657534	20.44831534	0.001330614

*Tabla 3.3 – Distancia máxima alcanzada 8-QAM/XG-PON.*

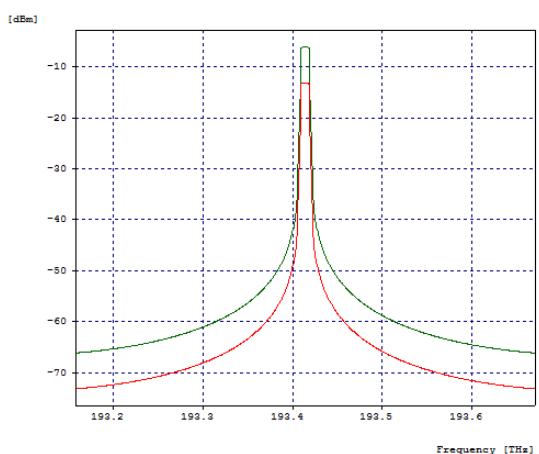
De la tabla 3.3 se ilustra que, para un modelo de red convergente OFDM-RoF/XG-PON, a una velocidad en el enlace descendente de 2.5 Gbps, y utilizando la técnica de modulación 8-QAM, la distancia máxima alcanzada es de 20 Km, lo

cual es bastante pertinente, ya que la recomendación ITU-T G.987.1 plantea un alcance máximo de longitud de fibra óptica monomodo igual a 20 km con la utilización de modulación externa, como se configuró en el modelo de red propuesto. Ahora bien, la figura 3.11 ilustra el espectro de radio frecuencia para la señal RF-OFDM en el transmisor (color verde) y en el receptor (color azul), utilizando un orden de modulación M=8.



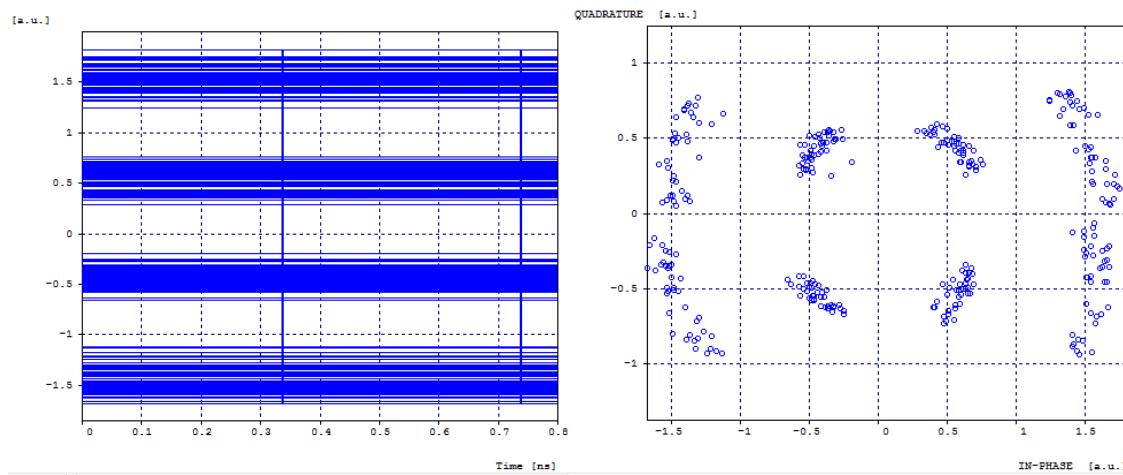
*Figura 3.11 – Señal RF-OFDM. a) Transmitida (verde). b) Recibida ONT (azul).*

De acuerdo con las mediciones realizadas en la figura 3.11, se tiene una potencia pico de salida de la señal RF-OFDM igual a -12.3481 dB y una potencia pico después del fotodetector tipo PIN igual a -104.1736 dB, con lo cual se evidencia una atenuación de 91.8255 dB. En la figura 3.12 (a) y (b), se ilustra el comportamiento de la señal RoF, cuando es modulada ópticamente y transportada por los 20 km de longitud de fibra óptica monomodo.



*Figura 3.12 – a) Señal RoF en la OLT (verde). b) Señal RoF en la ONT (rojo).*

Las mediciones tomadas para la figura 3.12, mostraron una atenuación de la señal RoF en el domino óptico después de pasar por los 20 km de longitud de fibra óptica de aproximadamente 7.0575 dB, ya que tal señal medida en el transmisor es de -6.0348 dBm con una OSNR de 60.1892, mientras que la misma señal medida en el receptor, antes de la conversión óptica a eléctrica, es de -13.0923 dBm con una OSNR igual a 60.1617 dB. En la figura 3.13 (a) y (b), se presenta el diagrama de ojo y el diagrama de constelación para el orden de modulación 8-QAM.



*Figura 3.13 – a) Diagrama de ojo señal “I” 8-QAM en el receptor. b) Diagrama de constelación 8-QAM en el receptor.*

De la figura 3.13 (b), se puede observar que existe un desplazamiento o rotación de fase en el diagrama de constelación, lo cual es debido a los fenómenos lineales y no lineales presentes en la fibra óptica, así como también la detección no coherente definida en la red convergente OFDM-RoF, sin embargo, los resultados de la tabla 3.3, demostraron que se tiene una BER igual a 1.3E-3, con un factor de calidad de 13.1 dB, con lo cual es posible una recuperación aceptable de la señal transmitida dentro del modelo de red convergente OFDM-RoF/XG-PON, utilizando un orden de modulación 8-QAM, a 20 km de longitud de fibra óptica. La tabla 3.4 ilustra un resumen de las mediciones obtenidas en esta sección.

PARÁMETRO	Valor Tx OLT	Valor Rx ONT.
<b>Potencia señal RF-OFDM eléctrica [dB]</b>	-12.3481	-104.1736
<b>Potencia señal RoF óptica [dBm]</b>	-6.0348	-13.0923
<b>OSNR [dB]</b>	60.1892	60.1617
<b>BER</b>	1E-40	1.3E-3
<b>Factor Q [dB]</b>	40	13.1
<b>EVM [%]</b>	ideal	22.1142
<b>Apertura de ojo [a.u.]</b>	0.8164	0.461
<b>Jitter [ns]</b>	0.0	0.0993

*Tabla 3.4 – Resultados modelo de red OFDM-RoF/XGS-PON 8-QAM.*

Con los resultados de la simulación, es necesario afirmar que es posible una implementación de la técnica de modulación 8-QAM para la infraestructura de red convergente OFDM-RoF/XG-PON en el enlace descendente a 2.5 Gbps, alcanzando una distancia máxima de 20 km sin la utilización de amplificadores y compensadores ópticos. Así mismo, para el sistema evaluado en el mínimo desempeño se obtuvo una BER de 1.3E-3 con un factor de calidad igual a 13.1 dB, los cuales son valores aceptables para sistemas de radiofrecuencia. También, se determina que con el orden de modulación 8-QAM, se puede alcanzar una mayor distancia en comparación con el orden de modulación 4-QAM.

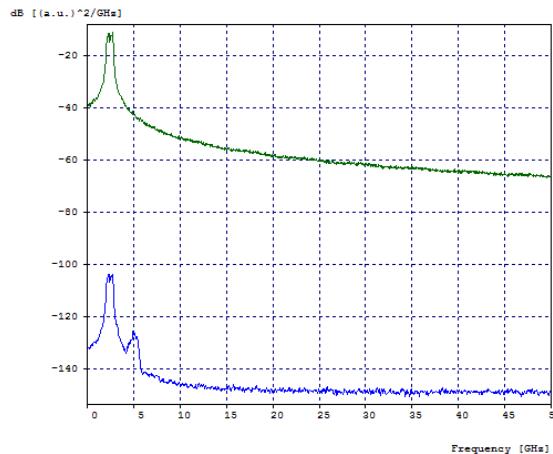
### **3.1.3. SISTEMA OFDM-RoF 16-QAM XG-PON**

De acuerdo con la ecuación 2.6, se puede observar que el cálculo de la BER depende de la SNR y del orden de modulación M-QAM, por tanto, es necesario realizar el procedimiento para encontrar la distancia máxima alcanzada para una modulación 16-QAM, y después evaluar, tal orden de modulación dentro del modelo de red convergente, como se muestra en la tabla 3.5.

D[km]	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lin]	BER (con SNR [lin])
<b>2.6</b>	7.5601	22.4294492	174.9624775	1.24117E-09
<b>3.6</b>	7.2879	22.7479519	188.2760985	3.16577E-10
<b>4.6</b>	7.3993	22.61618728	182.6496012	5.63778E-10
<b>5.6</b>	7.1642	22.89664597	194.8339329	1.61654E-10
<b>6.6</b>	7.2186	22.83094046	191.908427	2.18159E-10
<b>7.6</b>	7.1291	22.93930587	196.7571788	1.32747E-10
<b>8.6</b>	8.4553	21.45741957	139.8755984	4.6082E-08
<b>9.6</b>	8.4257	21.48788016	140.8601078	4.16241E-08
<b>10.6</b>	8.5146	21.39671499	137.9340535	5.63248E-08
<b>11.6</b>	8.4543	21.45844691	139.9086902	4.59247E-08
<b>12.6</b>	8.9002	21.01200468	126.2410122	1.89024E-07
<b>13.6</b>	9.9977	20.00199798	100.0460159	2.89014E-06
<b>14.6</b>	11.942	18.45845866	70.12063919	6.76799E-05
<b>15.6</b>	13.7362	17.24266789	52.99889183	0.00042413
<b>16.6</b>	14.0157	17.06770414	50.90616888	0.00053204
<b>17.6</b>	13.6059	17.32545451	54.01886447	0.00037985
<b>18.6</b>	13.845	17.1741408	52.16918833	0.000463978
<b>19.6</b>	13.2453	17.55876401	57.00020287	0.000275409
<b>19.7</b>	13.3437	17.49447461	56.16263315	0.000301411
<b>19.8</b>	14.1767	16.96849702	49.75648606	0.00060276
<b>19.9</b>	14.2568	16.91955886	49.19895583	0.000640413
<b>20</b>	13.4197	17.44514386	55.528301	0.000322742

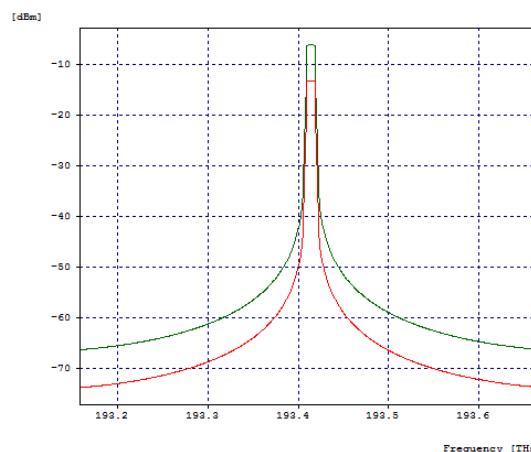
*Tabla 3.5 – Distancia máxima alcanzada 16-QAM/XG-PON.*

De la tabla 3.5 se puede concluir que, para un modelo de red convergente OFDM-RoF/XG-PON, a una velocidad en el enlace descendente de 2.5 Gbps, y utilizando la técnica de modulación 16-QAM, la distancia máxima alcanzada es de 20 km, lo cual es bastante pertinente, ya que la recomendación ITU-T G.987.1 plantea un alcance máximo de longitud de fibra óptica monomodo igual a 20 km con la utilización de modulación externa, como se configuró en el modelo de red propuesto. Ahora bien, la figura 3.14 ilustra el espectro de radio frecuencia para la señal RF-OFDM en el transmisor (color verde) y en el receptor (color azul), utilizando un orden de modulación M=16.



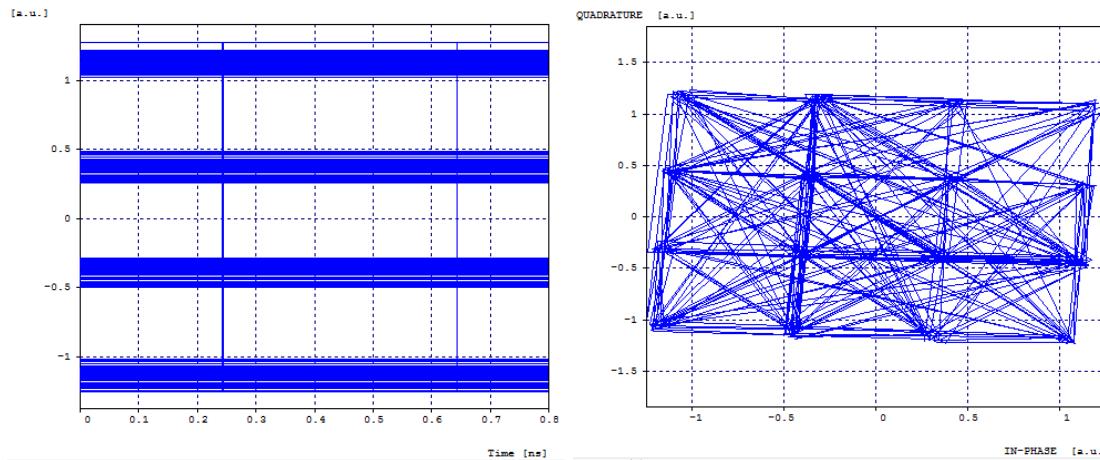
*Figura 3.14 – Señal RF-OFDM. a) Transmitida (verde). b) Recibida ONT (azul).*

De acuerdo con las mediciones realizadas en la figura 3.14, se tiene una potencia pico de salida de la señal RoF igual a -12.3481 dB y una potencia pico después del fotodetector tipo PIN igual a -104.1736 dB, con lo cual se evidencia una atenuación de 91.8255 dB. En la figura 3.15 (a) y (b), se ilustra el comportamiento de la señal RoF, cuando es modulada ópticamente y transportada por los 20 km de longitud de fibra óptica monomodo.



*Figura 3.15 - a) Señal RoF en la OLT (verde). b) Señal RoF en la ONT (rojo).*

Las mediciones tomadas para la figura 3.15, mostraron una atenuación de la señal RoF en el domino óptico después de pasar por los 20 km de longitud de fibra óptica de aproximadamente 7.0575 dB, ya que tal señal medida en el transmisor es de -6.0348 dBm con una OSNR de 60.1892, mientras que la misma señal medida en el receptor, antes de la conversión óptica a eléctrica, es de -13.0923 dBm con una OSNR igual a 60.1617 dB. En la figura 3.16 (a) y (b), se presenta el diagrama de ojo y el diagrama de constelación para el orden de modulación 16-QAM.



*Figura 3.16 - a) Diagrama de ojo señal "I" 16-QAM en el receptor. b) Diagrama de constelación señal 16-QAM en el receptor.*

De la figura 3.16 (b), se puede observar que existe un desplazamiento o rotación de fase en el diagrama de constelación, lo cual es debido a los fenómenos lineales y no lineales presentes en la fibra óptica, así como también la detección no coherente definida en la red convergente OFDM-RoF, sin embargo, los resultados de la tabla 3.5, demostraron que se tiene una BER igual a 3.2E-4, con un factor de calidad de 17.44 dB, con lo cual es posible una recuperación aceptable de la señal transmitida dentro del modelo de red convergente OFDM-RoF/XG-PON, utilizando un orden de modulación 16-QAM, a 20 km de longitud de fibra óptica. La tabla 3.6 ilustra un resumen de las mediciones obtenidas en esta sección.

PARÁMETRO	Valor Tx OLT	Valor Rx ONT.
<b>Potencia señal RF-OFDM eléctrica [dB]</b>	-11.0817	-103.3403
<b>Potencia señal RoF óptica [dBm]</b>	-6.0365	-13.0922
<b>OSNR [dB]</b>	60.3076	60.7174
<b>BER</b>	1E-40	3.2E-4
<b>Factor Q [dB]</b>	40	17.44
<b>EVM [%]</b>	ideal	13.4197
<b>Apertura de ojo [a.u.]</b>	0.6324	0.5047
<b>Jitter [ns]</b>	0.0	0.0057

*Tabla 3.6 – Resultados modelo de red OFDM-RoF/XG-PON 16-QAM.*

De acuerdo con los resultados de la simulación, es necesario afirmar que es posible una implementación de la técnica de modulación 16-QAM para la infraestructura de red convergente OFDM-RoF/XG-PON en el enlace descendente a 2.5 Gbps, alcanzando una distancia de 20 km sin la utilización de amplificadores y compensadores ópticos. Así mismo, para el sistema evaluado se obtuvo un desempeño aceptable, con una BER de 3.2E-4, y un factor de calidad igual a 17.44 dB, los cuales son valores aceptables para sistemas de radiofrecuencia. También, se determina que con el orden de modulación 16-QAM, se puede alcanzar una mayor distancia en comparación con el orden de modulación 4-QAM, así como también se observa una mayor potencia de transmisión para 16-QAM respecto del orden de modulación 8-QAM.

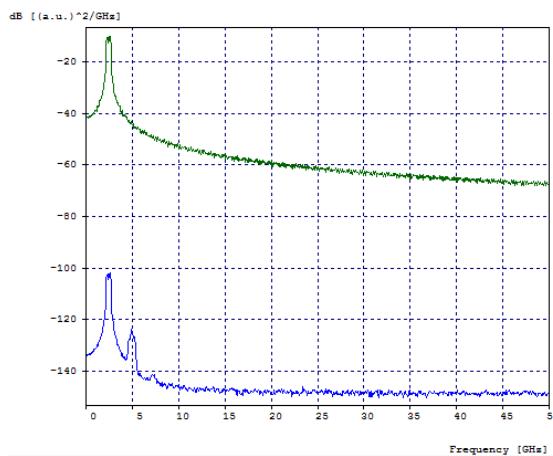
### **3.1.4. SISTEMA OFDM-RoF 64-QAM XG-PON**

Se realiza el procedimiento para encontrar la distancia máxima alcanzada para una modulación 64-QAM, y después evaluar, tal orden de modulación dentro del modelo de red convergente, como se muestra en la tabla 3.7.

D[km]	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lin]	BER (con SNR [lin])
<b>2.6</b>	6.8233	23.32011067	214.7885209	0.000403441
<b>3.6</b>	6.8915	23.23372479	210.558355	0.000450032
<b>4.6</b>	6.7569	23.40505017	219.030713	0.000361616
<b>5.6</b>	6.7838	23.37053929	217.2970993	0.00037815
<b>6.6</b>	6.7569	23.40505017	219.030713	0.000361616
<b>7.6</b>	6.82	23.32431251	214.9964311	0.000401282
<b>8.6</b>	7.117	22.95406068	197.4267827	0.000632434
<b>9.6</b>	7.2162	22.83382877	192.0360999	0.000727581
<b>10.6</b>	7.2094	22.84201756	192.3985327	0.000720751
<b>11.6</b>	7.0833	22.99528728	199.3098343	0.000602258
<b>12.6</b>	7.202	22.85093766	192.7941119	0.000713371
<b>13.6</b>	7.173	22.88598338	194.3561727	0.000684968
<b>14.6</b>	7.2457	22.79839303	190.4755792	0.000757748
<b>15.6</b>	7.0157	23.0785798	203.1692514	0.000544892
<b>16.6</b>	7.1569	22.90550102	195.2315948	0.000669555
<b>17.6</b>	6.945	23.166555	207.3268264	0.000489267
<b>18.6</b>	7.055	23.03005964	200.9120402	0.000577734
<b>19.6</b>	7.2465	22.79743407	190.4335252	0.000758578
<b>19.7</b>	7.0341	23.05582924	202.1077297	0.000560095
<b>19.8</b>	7.3571	22.66586682	184.7509506	0.000879715
<b>19.9</b>	7.2921	22.74294769	188.0592798	0.000806984
<b>20</b>	7.1371	22.92956436	196.3163344	0.000650943

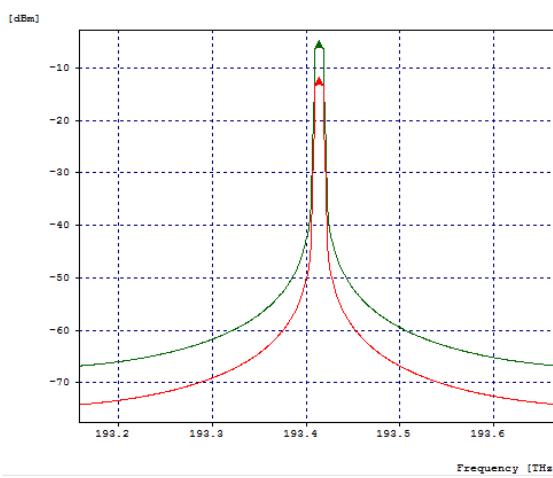
*Tabla 3.7 – Distancia máxima alcanzada 64-QAM/XG-PON.*

De la tabla 3.7 se observa que, para un modelo de red convergente OFDM-RoF/XG-PON, a una velocidad en el enlace descendente de 2.5 Gbps, y utilizando la técnica de modulación 64-QAM, la distancia máxima alcanzada es de 20 km. La figura 3.17 ilustra el espectro de radio frecuencia para la señal RF-OFDM en el transmisor (color verde) y en el receptor (color azul), utilizando un orden de modulación  $M=64$ .



*Figura 3.17 - Señal RF-OFDM. a) Transmitida (verde). b) Recibida ONT (azul).*

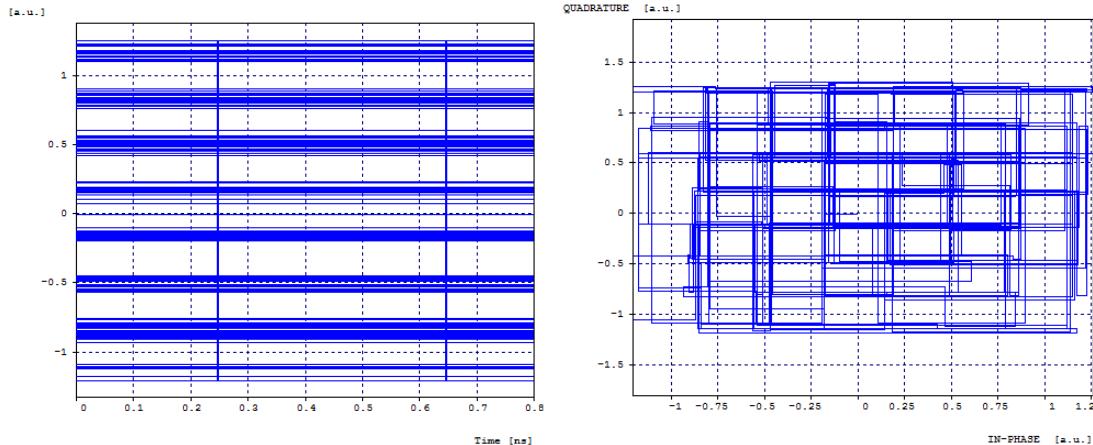
De acuerdo con las mediciones realizadas en la figura 3.17, se tiene una potencia pico de salida de la señal RoF igual a -9.7265 dB y una potencia pico después del fotodetector tipo PIN igual a -101.6959 dB, con lo cual se evidencia una atenuación de 91.8255 dB. En la figura 3.18 (a) y (b), se ilustra el comportamiento de la señal RoF, cuando es modulada ópticamente y transportada por los 20 km de longitud de fibra óptica monomodo.



*Figura 3.18 - a) Señal RoF en la OLT (verde). b) Señal RoF en la ONT (rojo).*

Las mediciones tomadas para la figura 3.18, mostraron una atenuación de la señal RoF en el domino óptico después de pasar por los 20 km de longitud de fibra óptica de aproximadamente 7.0575 dB, ya que tal señal medida en el transmisor es de -6.0331 dBm con una OSNR de 60.8759, mientras que la misma señal medida

en el receptor, antes de la conversión óptica a eléctrica, es de -13.0884 dBm con una OSNR igual a 61.1963 dB. En la figura 3.19 (a) y (b), se presenta el diagrama de ojo y el diagrama de constelación para el orden de modulación 64-QAM.



*Figura 3.19 - a) Diagrama de ojo señal "I" 64-QAM en el receptor. b) Diagrama de constelación señal 64-QAM en el receptor.*

De la figura 3.19 (b), se puede observar que los símbolos presentan baja dispersión respecto del símbolo de referencia, también, se muestra un diagrama de constelación 64-QAM simulado en Optsim con visualización plana, para mejor observación por parte del lector. Los resultados de la tabla 3.7, demostraron que se tiene una BER igual a 6.5E-4, con un factor de calidad de 17.44 dB, con lo cual es posible una recuperación aceptable de la señal transmitida dentro del modelo de red convergente OFDM-RoF/XG-PON, utilizando un orden de modulación 64-QAM, a 20 km de longitud de fibra óptica. La tabla 3.8 ilustra un resumen de las mediciones obtenidas en esta sección.

PARÁMETRO	Valor Tx OLT	Valor Rx ONT.
<b>Potencia señal RF-OFDM eléctrica [dB]</b>	-9.7265	-101.6959
<b>Potencia señal RoF óptica [dBm]</b>	-6.0331	-13.0884
<b>OSNR [dB]</b>	60.8759	61.1963
<b>BER</b>	1E-40	6.5E-4
<b>Factor Q [dB]</b>	40	22.92
<b>EVM [%]</b>	ideal	7.1371
<b>Apertura de ojo [a.u]</b>	0.6324	0.5047
<b>Jitter [ns]</b>	0.0	0.0057

*Tabla 3.8 – Resultados modelo de red OFDM-RoF/XG-PON 64-QAM.*

De acuerdo con los resultados de la simulación, es necesario afirmar que es posible una implementación de la técnica de modulación 64-QAM para la infraestructura de red convergente OFDM-RoF/XG-PON en el enlace descendente a 2.5Gbps, alcanzando una distancia de 20 km sin la utilización de amplificadores y compensadores ópticos. Así mismo, para el sistema evaluado se obtuvo un desempeño aceptable, con una BER de 6.5E-4, y un factor de calidad igual a 22.92

dB, los cuales son valores aceptables para sistemas de radiofrecuencia. También, se determina que con el orden de modulación 64-QAM, se puede alcanzar una mayor distancia en comparación con el orden de modulación 4-QAM, así como también se observa una mayor potencia de transmisión para 64-QAM respecto del orden de modulación 8-QAM y 16-QAM.

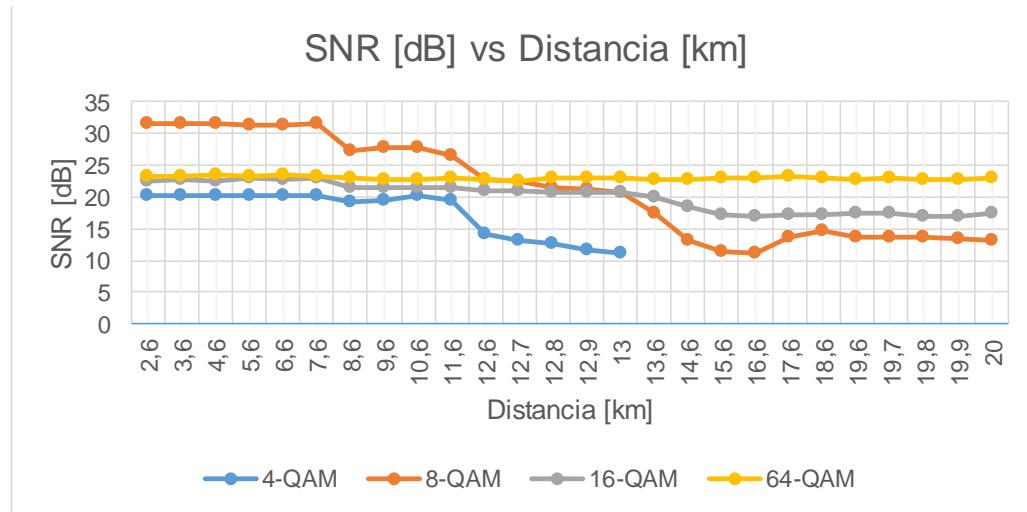


Figura 3.20 – SNR [dB] vs Distancia [km] para Modulación M-QAM a 2.5 Gbps.

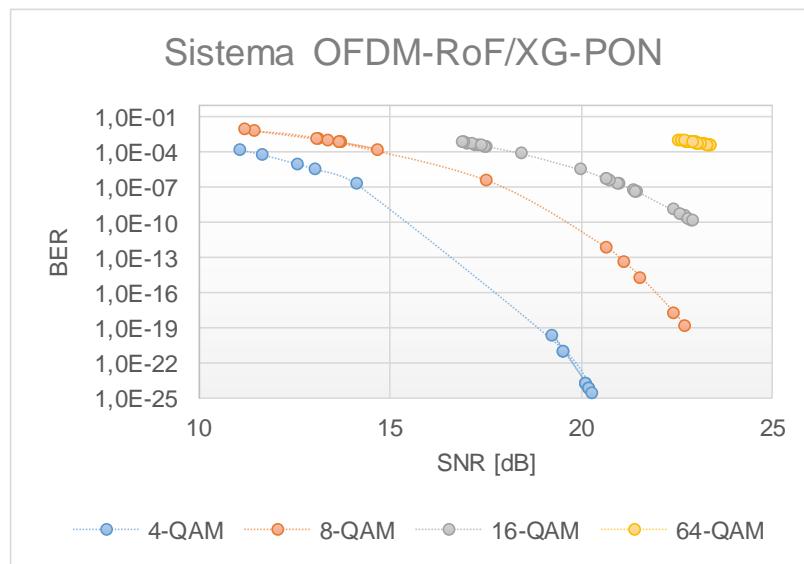


Figura 3.21 – BER vs SNR para M-QAM en el sistema OFDM-RoF/XG-PON.

En relación a lo observado en las gráficas de las figuras 3.20 y 3.21, se nota que con un incremento en el orden de modulación M-QAM, para la infraestructura de red OFDM-RoF, a una velocidad de datos descendente igual a 2.5 Gbps, es posible representar mayor cantidad de bits por símbolo, sin embargo, a medida que aumenta la proximidad de los símbolos dentro de la constelación, es susceptible a una mayor BER debido a los fenómenos de ruido y distorsión, lo cual requiere un nivel más alto de potencia transmitida de la señal; es el caso de la comparación entre los extremos 4-QAM y 64-QAM, en los cuales para 13 km de longitud de fibra

óptica de acuerdo con la figura 3.20, se tiene una relación SNR aproximada de 10.8 dB y 22.8 dB, respectivamente. Por su parte se observa que 8-QAM es el orden de modulación que presenta un mayor desempeño en potencia sobre la región comprendida entre los 14 a 20 km de longitud de fibra óptica, aproximadamente; sin embargo, se tiene una penalización en la eficiencia espectral y velocidad de transmisión de datos comparado con 64-QAM.

### **3.2. ESCENARIO DE SIMULACIÓN XGS-PON**

Como parte de los objetivos del trabajo de grado, se procede a migrar el modelo de red convergente de XG-PON a XGS-PON, posteriormente, evaluar que sucede con la técnica de modulación M-QAM en tal escenario. Ahora bien, de acuerdo con los estándares proporcionados para NG-PON1, tales como ITU-T G.987.1 e ITU-T G.9807.1, se plantea una migración de la tecnología XG-PON a XGS-PON manteniendo en lo posible la misma ODN, con una alcance máximo de longitud de fibra óptica de al menos 20 km, utilizando una fibra monomodo cuyos parámetros de desempeño se rigen bajo el estándar ITU-T G.652. Por lo anterior, en la tabla 3.9 se presentan las configuraciones nuevas para el modelo de red convergente OFDM-RoF/XGS-PON.

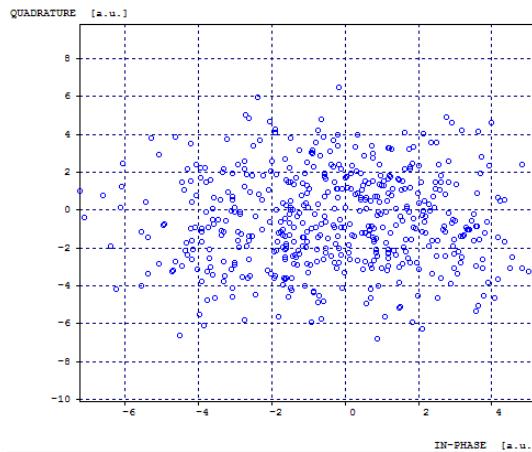
Parámetro	Valor
Velocidad Tx datos	10 Gbps
Frecuencia portadora RF	10 GHz
Formatos de Modulación	4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM
Subportadoras IFFT-OFDM	8
Prefijo cíclico	0.25 GHz
Retardo	0
Frecuencia del Láser CW	193.41449 THz (Onda continua)
Potencia del Láser CW	0 dBm
Longitud de onda del láser	1550 nm
Modulador óptico	Modulador LiNb-MZM
Fibra Óptica	ITU-T G.652 (SSMF-28e)
Fotodetector	Tipo PIN
Filtro eléctrico receptor 1 y 2	Filtro Bessel con 7 número de polos
Filtro Óptico	Filtro coseno alzado, roll-off = 0.5.
Bw filtro eléctrico 1 y 2	10 GHz

Tabla 3.9 – Configuraciones modelo de red convergente OFDM-RoF/XGS-PON.

#### **3.2.1. SISTEMA OFDM-RoF 4-QAM XGS-PON**

Los resultados de la simulación para el orden de modulación 4-QAM a una velocidad de datos en el enlace descendente de 10 Gbps, bajo el sistema OFDM-RoF, con una frecuencia portadora RF-OFDM de 10GHz y 8 subportadoras OFDM, se presentan en la siguiente sección. La figura 3.22 ilustra el diagrama de constelación 4-QAM en el receptor a 13 km de longitud de fibra óptica, la cual fue

una distancia máxima encontrada para el sistema 4-QAM a una velocidad de datos en el enlace descendente de 2.5 Gbps. Como se observa, el ruido ha superado la señal de datos, por tanto, no es posible una recuperación exitosa de la información en el receptor para el orden de modulación 4-QAM a 13 km de longitud de fibra, la razón es que existe un aumento en la velocidad de transmisión datos y también, la frecuencia portadora de RF se subió a 10 GHz, por lo que en esta frecuencia de RF, la dispersión cromática es el fenómeno que más afecta la señal OFDM-RoF, y aumenta con una longitud de fibra óptica mayor.



*Figura 3.22 – Diagrama de constelación señal 4-QAM a 13 km de fibra óptica.*

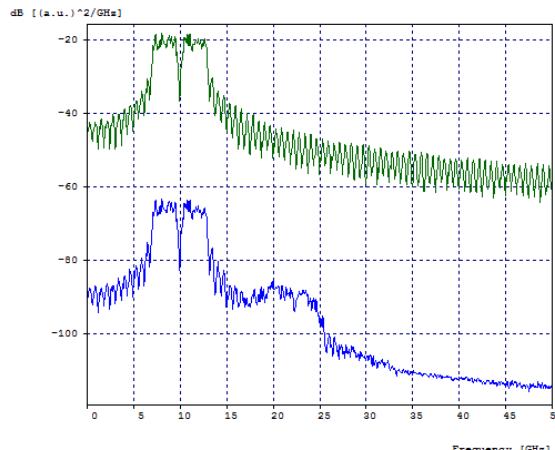
De acuerdo con la figura 3.22, es debido encontrar la distancia máxima a la cual este sistema es funcional, es decir, la distancia a la cual se obtiene una BER alrededor de 10E-3 o inferior. La tabla 3.10 presenta las diferentes simulaciones que se realizaron hasta encontrar la BER en el mínimo desempeño del sistema.

D[km]	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lin]	BER (con SNR [lin])
<b>2.6</b>	9.9821	20.01556167	100.3589635	6.35675E-24
<b>2.7</b>	9.8163	20.16104355	103.7777749	1.13165E-24
<b>2.8</b>	10.4494	19.61817292	91.58351159	5.34904E-22
<b>2.9</b>	12.0954	18.3475953	68.35330677	6.83379E-17
<b>3.0</b>	17.54	15.11940822	32.50430032	5.94645E-09
<b>3.1</b>	23.2326	12.6780437	18.52696878	8.37586E-06
<b>3.2</b>	32.7339	9.700044973	9.332639651	0.001125539

*Tabla 3.10 – Distancia máxima alcanzada 4-QAM/XGS-PON.*

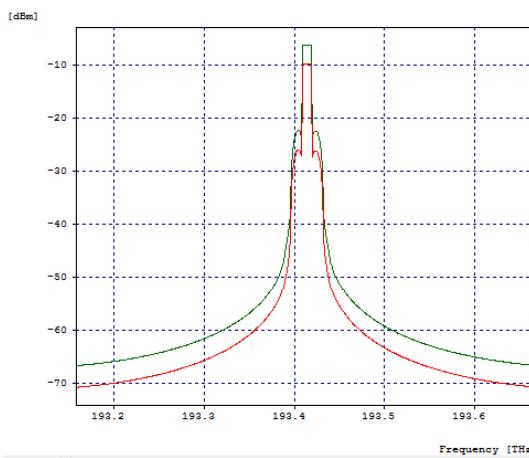
En la tabla 3.10 se observa que la distancia máxima alcanzada para un orden de modulación 4-QAM a 10 Gbps en el enlace descendente es aproximadamente 3.2 km, con la cual se obtuvo una BER igual a 1.1E-3 y un factor de calidad de 9.7 dB. Por lo anterior, se toma esta distancia para las evaluaciones de potencia del sistema OFDM-RoF, así como también, las otras métricas de estudio planteadas. La figura 3.23 ilustra el espectro de radio frecuencia para la señal RF-OFDM en el

transmisor (color verde) y en el receptor (color azul), utilizando un orden de modulación M=4.



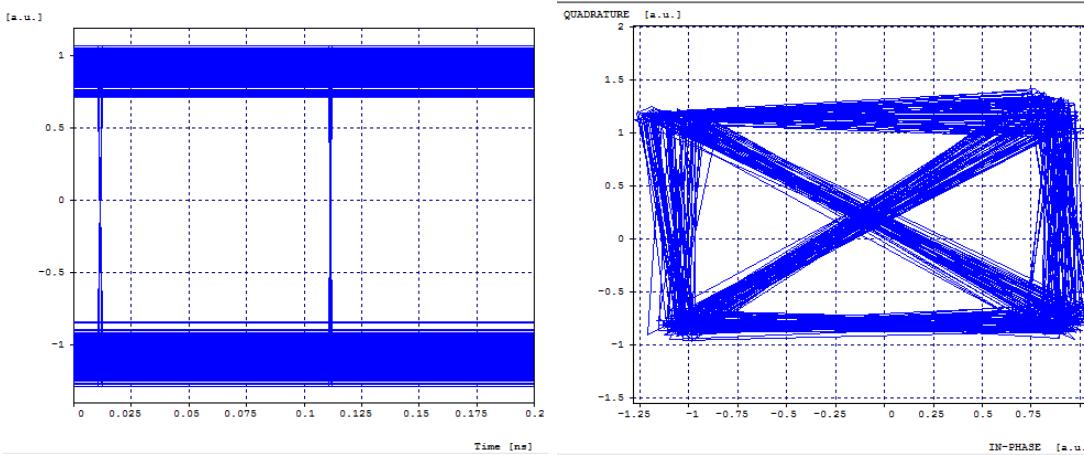
*Figura 3.23 – Señal RF-OFDM. a) Transmitida (verde). b) Recibida ONT (azul).*

En las mediciones realizadas para la figura 3.23, se tiene una potencia para la señal RF-OFDM en el transmisor de -18.1961 dB. Así mismo, en el receptor se tiene una potencia de -63.3462 dB, se dice entonces que la señal se ha atenuado alrededor de 45.15 dB. En la figura 3.24 (a) y (b), se ilustra el comportamiento de la señal RoF, cuando es modulada ópticamente y transportada por los 3.2 km de longitud de fibra óptica monomodo.



*Figura 3.24 - a) Señal RoF en la OLT (verde). b) Señal RoF en la ONT (rojo).*

Las mediciones tomadas para la figura 3.24, mostraron una atenuación de la señal RoF en el domino óptico después de pasar por los 3.2 km de longitud de fibra óptica de aproximadamente 3.6327 dB, ya que tal señal medida en el transmisor es de -6.2012 dBm con una OSNR de 60.6778, mientras que la misma señal medida en el receptor, antes de la conversión óptica a eléctrica, es de -9.8339 dBm con una OSNR igual a 61.1341 dB. En la figura 3.25 (a) y (b), se presenta el diagrama de ojo y el diagrama de constelación para el orden de modulación 4-QAM.



*Figura 3.25 – a) Diagrama de ojo señal “I” 4-QAM en el receptor. b) Diagrama de constelación señal 4-QAM en el receptor.*

En la figura 3.25 (b), los símbolos se encuentran un poco dispersos sobre el punto de referencia, lo cual es debido a los fenómenos lineales y no lineales presentes en la fibra óptica, así como también la detección no coherente definida en la red convergente OFDM-RoF, sin embargo, los resultados de la tabla 3.10, demostraron que se tiene una BER igual a 1.1E-3, con un factor de calidad de 9.7 dB, con lo cual es posible una recuperación aceptable de la señal transmitida dentro del modelo de red convergente OFDM-RoF/XGS-PON, utilizando un orden de modulación 4-QAM, a 3.2 km de longitud de fibra óptica. La tabla 3.11 ilustra un resumen de las mediciones obtenidas en esta sección.

PARÁMETRO	Valor Tx OLT	Valor Rx ONT.
<b>Potencia señal RF-OFDM eléctrica [dB]</b>	-18.1961	-63.3462
<b>Potencia señal RoF óptica [dBm]</b>	-6.2012	-9.8339
<b>OSNR [dB]</b>	60.6778	61.1341
<b>BER</b>	1E-40	1.1E-3
<b>Factor Q [dB]</b>	40	9.7
<b>EVM [%]</b>	ideal	32.7339
<b>Apertura de ojo [a.u.]</b>	1.41421	1.55
<b>Jitter [ns]</b>	0.0582	0.0472

*Tabla 3.11 – Resultados modelo de red OFDM-RoF/XGS-PON 4-QAM.*

De acuerdo con los resultados de las simulaciones hasta el momento, se debe notar que, cuando se realizó la migración de XG-PON a XGS-PON la distancia máxima alcanzada para 4-QAM sobre el modelo de red convergente OFDM-RoF se disminuye de 13 km iniciales para 2.5 Gbps a 3.2 km para 10 Gbps, con el fin de obtener una BER en el mínimo desempeño. Por lo anterior, se dice que se puede implementar tal modelo de red convergente en el enlace descendente a 10 Gbps, para prestar servicios de última milla con un gran ancho de banda para los usuarios finales; si se desea alcanzar una mayor distancia para el modelo de red, es pertinente implementar amplificadores ópticos y eléctricos, además de compensadores de

señal y ecualización. Así mismo, para el sistema evaluado se obtuvo un desempeño aceptable, con una BER de 1.1E-3, y un factor de calidad igual a 9.7 dB.

### **3.2.2. SISTEMA OFDM-RoF 8-QAM XGS-PON**

Para el orden de modulación 8-QAM se observó que, el ruido ha superado la señal de información para el alcance para una longitud de fibra óptica de 20 km, por tanto, no es posible una recuperación exitosa en el receptor. La tabla 3.12 presenta las diferentes simulaciones que se realizaron hasta encontrar la BER en el mínimo desempeño del sistema.

D[km]	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lin]	BER (con SNR [lin])
<b>2.6</b>	4.2201	27.49354516	561.5061478	1.23773E-54
<b>3.6</b>	22.6322	12.90546455	19.52299555	0.001654425
<b>4.6</b>	19.0685	14.39366938	27.50216844	0.000258327
<b>4.7</b>	19.4645	14.21513496	26.39450342	0.000333467
<b>4.8</b>	20.4544	13.78426511	23.9015745	0.000593929
<b>4.9</b>	21.6423	13.29393174	21.3497687	0.001076993
<b>5</b>	23.0281	12.75483787	18.85748568	0.00193598

Tabla 3.12 – Distancia máxima alcanzada 8-QAM/XGS-PON.

En la tabla 3.12 se observa que la distancia máxima alcanzada para un orden de modulación 8-QAM a 10 Gbps en el enlace descendente es aproximadamente 5 km, con la cual se obtuvo una BER igual a 1.9E-3 y un factor de calidad de 12.75 dB. Por lo anterior, se toma esta distancia encontrada en el mínimo desempeño para las evaluaciones de potencia del sistema OFDM-RoF, así como también, las otras métricas de estudio planteadas. La figura 3.26 ilustra el espectro de radio frecuencia para la señal RF-OFDM en el transmisor (color verde) y en el receptor (color azul), utilizando un orden de modulación M=8.

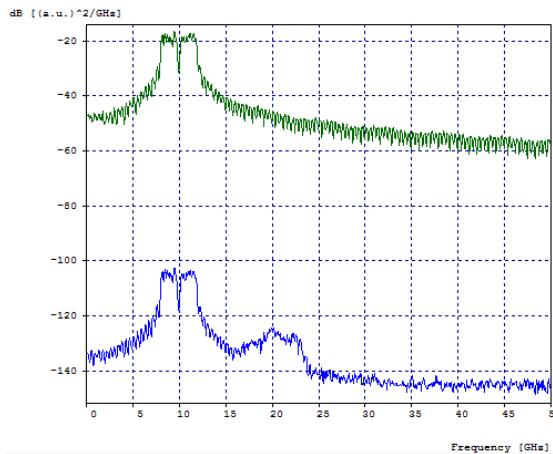
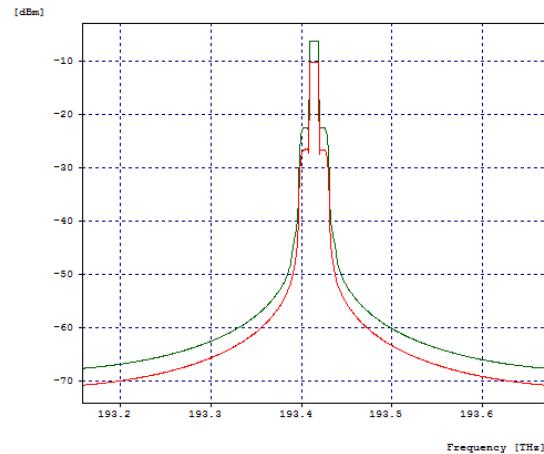


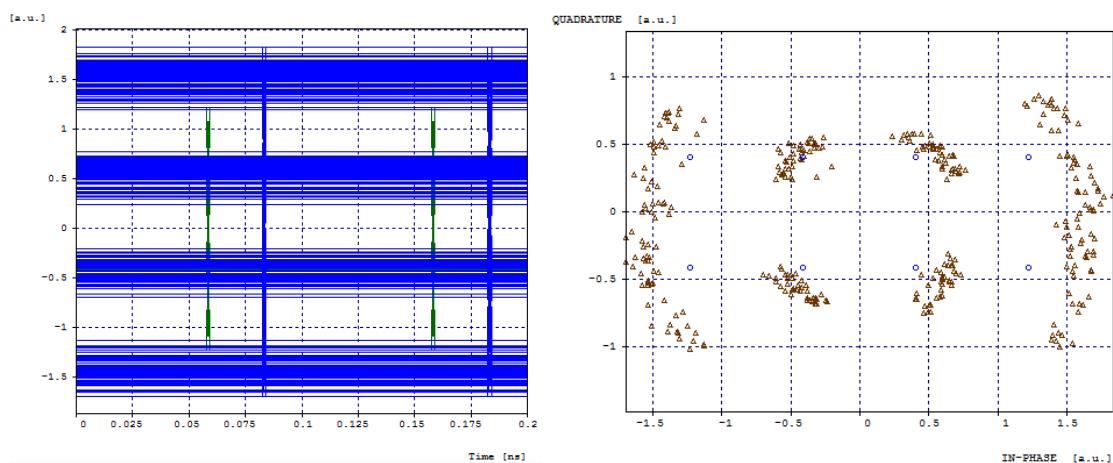
Figura 3.26 – Señal RF-OFDM. a) Transmitida (verde). b) Recibida ONT (azul).

De acuerdo con las mediciones realizadas para la figura 3.25, se tiene una potencia para la señal RF-OFDM en el transmisor de -16.5547 dB. Así mismo, en el receptor se tiene una potencia de -102.3441 dB, se dice entonces que la señal se ha atenuado alrededor de 85.7894 dB. En la figura 3.27 (a) y (b), se ilustra el comportamiento de la señal RoF, cuando es modulada ópticamente y transportada por los 5 km de longitud de fibra óptica monomodo.



*Figura 3.27 – a) Señal RoF en la OLT (verde). b) Señal RoF en la ONT (rojo).*

Las mediciones tomadas para la figura 3.27, mostraron una atenuación de la señal RoF en el domino óptico después de pasar por los 5 km de longitud de fibra óptica de aproximadamente 3.6327 dB, ya que tal señal medida en el transmisor es de -6.20548 dBm con una OSNR de 61.4541, mientras que la misma señal medida en el receptor, antes de la conversión óptica a eléctrica, es de -10.1427 dBm con una OSNR igual a 60.6494 dB. En la figura 3.28 (a) y (b), se presenta el diagrama de ojo y el diagrama de constelación para el orden de modulación 8-QAM.



*Figura 3.28 – a) Diagrama de ojo señal “I” 8-QAM en el receptor. b) Diagrama de constelación señal 8-QAM en el receptor.*

Los resultados de la tabla 3.12, demostraron que se tiene una BER igual a 1.9E-3, con un factor de calidad de 12.75 dB, con lo cual es posible una recuperación aceptable de la señal transmitida dentro del modelo de red convergente OFDM-RoF/XGS-PON, utilizando un orden de modulación 8-QAM, a 5 km de longitud de fibra óptica. La tabla 3.13 ilustra los datos obtenidos.

PARÁMETRO	Valor Tx OLT	Valor Rx ONT.
Potencia señal RF-OFDM eléctrica [dB]	-16.5547	-102.3441
Potencia señal RoF óptica [dBm]	-6.20548	-10.1427
OSNR [dB]	61.4541	60.6494
BER	1E-40	1.9E-3
Factor Q [dB]	40	9.75
EVM [%]	ideal	23.0281
Apertura de ojo [a.u]	0.81649	0.419127
Jitter [ns]	0	0.0243437

Tabla 3.13 – Resultados modelo de red OFDM-RoF/XGS-PON 8-QAM.

De acuerdo con los resultados de la simulación, es necesario afirmar que cuando se realizó la migración de XG-PON a XGS-PON la distancia máxima alcanzada para el modelo de red convergente OFDM-RoF/XGS-PON se disminuye de 20 km iniciales para 2.5 Gbps a 5 km para 10 Gbps, con el fin de obtener una BER en el mínimo desempeño igual a 1.9E-3. Por lo anterior, se dice entonces que se puede implementar tal modelo de red convergente en el enlace descendente a 10 Gbps, para prestar servicios de última milla con un gran ancho de banda para los usuarios; si se desea alcanzar una mayor distancia para el modelo de red, es pertinente implementar amplificadores ópticos y eléctricos, además de compensadores de señal y ecualización.

### 3.2.3. SISTEMA OFDM-RoF 16-QAM XGS-PON

Para el orden de modulación 16-QAM se observó que, el ruido ha superado la señal de datos para el alcance de 20 km de longitud de fibra óptica (*como se implementó en el modelo de red OFDM-RoF 16-QAM XG-PON*), por tanto, no es posible una recuperación exitosa en el receptor. La tabla 3.14 presenta las diferentes simulaciones que se realizaron hasta encontrar la BER en el mínimo desempeño del sistema.

D[km]	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lin]	BER (con SNR [lin])
<b>2.6</b>	8.786	21.12417602	129.5440893	1.34224E-07
<b>3.6</b>	13.0885	17.66220245	58.37410639	0.000237569
<b>4.6</b>	15.0499	16.44932772	44.15020978	0.001111168
<b>4.7</b>	15.1043	16.41798794	43.83275763	0.001150519
<b>4.8</b>	14.5561	16.73909939	47.19651582	0.000796441
<b>4.9</b>	15.6525	16.10832575	40.81620054	0.001603048
<b>5.0</b>	13.5694	17.3487871	54.30986339	0.000368097
<b>5.1</b>	12.473	18.08058155	64.27737838	0.000126185
<b>5.2</b>	11.8152	18.55117845	71.63377608	5.76245E-05
<b>5.3</b>	12.0344	18.39151115	69.04800181	7.58625E-05
<b>5.4</b>	11.9248	18.47097792	70.3230652	6.62385E-05
<b>5.5</b>	12.9115	17.78046601	59.98554387	0.000199812
<b>5.6</b>	15.7622	16.04766332	40.25004149	0.001706379

Tabla 3.14 – Distancia máxima alcanzada 16-QAM/XGS-PON.

En la tabla 3.14 se observa que la distancia máxima alcanzada para un orden de modulación 16-QAM a 10 Gbps en el enlace descendente es aproximadamente 5.6 km, con la cual se obtuvo una BER igual a 1.7E-3 y un factor de calidad de 16.047 dB. Por lo anterior, se toma esta distancia encontrada en el mínimo desempeño para las evaluaciones de potencia del sistema OFDM-RoF, así como también, las otras métricas de estudio planteadas. La figura 3.29 ilustra el espectro de radio frecuencia para la señal RF-OFDM en el transmisor (color verde) y en el receptor (color azul), utilizando un orden de modulación 16-QAM.

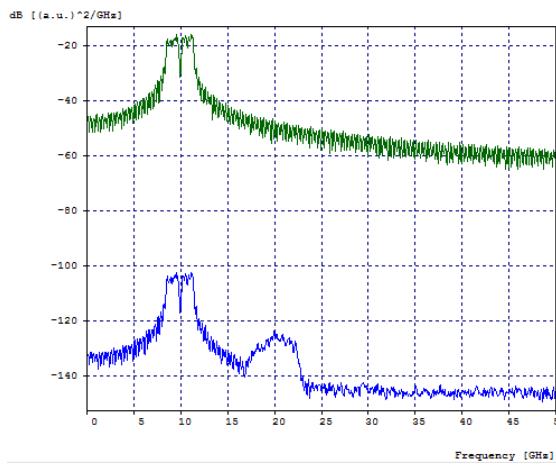
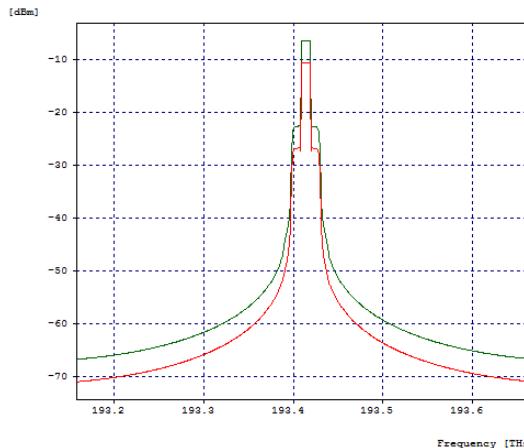


Figura 3.29 – Señal RF-OFDM. a) Transmitida (verde). b) Recibida (azul).

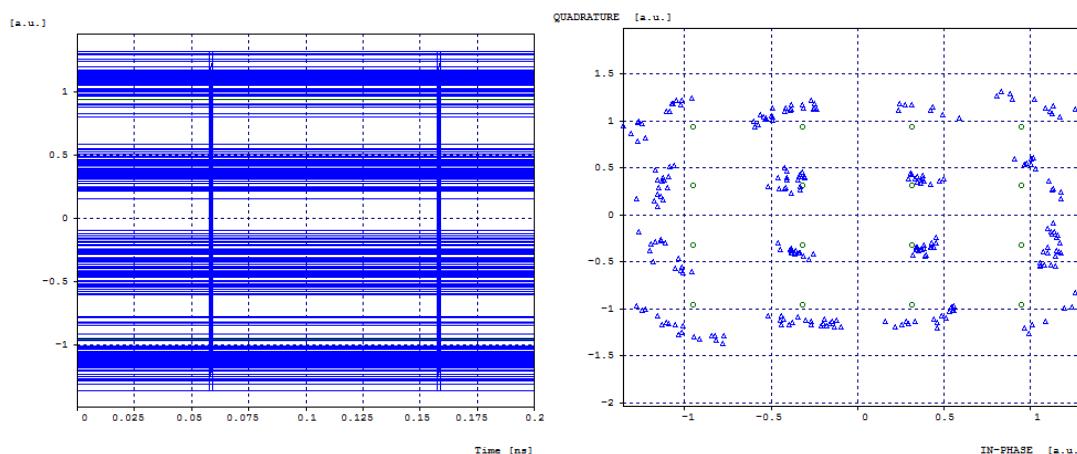
De acuerdo con las mediciones realizadas para la figura 3.29, se tiene una potencia para la señal OFDM-RoF en el transmisor de -15.6287 dB. Así mismo, en el receptor se tiene una potencia de -102.2173 dB, se dice entonces que la señal se ha atenuado alrededor de 86.5886 dB. En la figura 3.30 (a) y (b), se ilustra el

comportamiento de la señal RoF, cuando es modulada ópticamente y transportada por los 5 km de longitud de fibra óptica monomodo.



*Figura 3.30 - a) Señal RoF en la OLT (verde). b) Señal RoF en la ONT (rojo).*

Las mediciones tomadas para la figura 3.30, mostraron una atenuación de la señal RoF en el domino óptico después de pasar por los 5.6 km de longitud de fibra óptica de aproximadamente 3.6327 dB, ya que tal señal medida en el transmisor es -6.20871 dBm con una OSNR de 60.6206, mientras que la misma señal medida en el receptor, antes de la conversión óptica a eléctrica, es de -10.3202 dBm con una OSNR igual a 60.7606 dB. En la figura 3.31 (a) y (b), se presenta el diagrama de ojo y el diagrama de constelación para el orden de modulación 16-QAM.



*Figura 3.31 - a) Diagrama de ojo señal "I" 16-QAM en el receptor. b) Diagrama de constelación señal 16-QAM en el receptor.*

Los resultados de la tabla 3.14, demostraron que se tiene una BER igual a 1.7E-3, con un factor de calidad de 16.047 dB, con lo cual es posible una recuperación aceptable de la señal transmitida dentro del modelo de red convergente OFDM-RoF/XGS-PON, utilizando un orden de modulación 16-QAM, a 5.6 km de longitud de fibra óptica. La tabla 3.15 ilustra un resumen de las mediciones obtenidas en esta sección.

PARÁMETRO	Valor Tx OLT	Valor Rx ONT.
<b>Potencia señal RF-OFDM eléctrica [dB]</b>	-15.6287	-102.2173
<b>Potencia señal RoF óptica [dBm]</b>	-6.20871	-10.3202
<b>OSNR [dB]</b>	60.6206	60.7606
<b>BER</b>	1E-40	1.7E-3
<b>Factor Q [dB]</b>	40	12.047
<b>EVM [%]</b>	ideal	15.7622
<b>Apertura de ojo [a.u]</b>	0.6324	0.249653
<b>Jitter [ns]</b>	0	0

*Tabla 3.15 – Resultados modelo de red OFDM-RoF/XGS-PON 16-QAM.*

Finalmente, cuando se realizó la migración de XG-PON a XGS-PON la distancia máxima alcanzada para el modelo de red convergente OFDM-RoF/XGS-PON se disminuye de 20 km iniciales para 2.5 Gbps a 5.6 km para 10 Gbps, con el fin de obtener una BER en el mínimo desempeño igual a 1.7E-3. También se nota que realizando un aumento con un aumento en la velocidad de transmisión de datos sobre la red convergente evaluada a 5.6 km de longitud de fibra óptica, se obtiene una BER más alta, pasando de 1.1E-10 a 1.7E-3, sin embargo, la SNR es menor.

### 3.2.4. SISTEMA OFDM-RoF 64-QAM XGS-PON

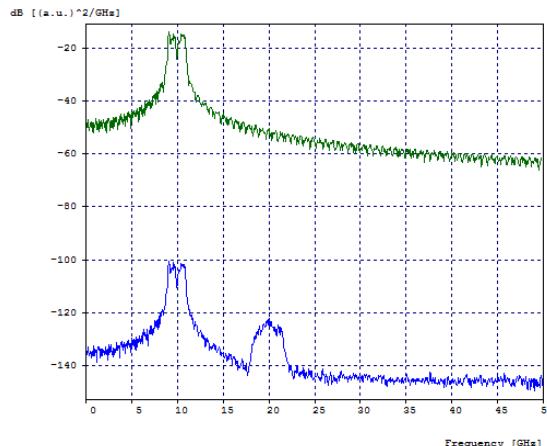
La tabla 3.16 presenta las diferentes simulaciones que se realizaron hasta encontrar el alcance máximo en el mínimo desempeño del sistema, es decir, con una BER sobre 1E-3.

D[km]	EVM [%]	SNR [dB]	SNR [lin]	BER (con SNR [lin])
<b>2.6</b>	7.4164	22.5961371	181.8083015	0.000949991
<b>3.6</b>	7.737	22.22854806	167.0532027	0.001398745
<b>4.6</b>	7.2952	22.73925595	187.8994871	0.000810353
<b>5.6</b>	7.1599	22.90186087	195.0680249	0.000672408
<b>5.7</b>	7.5161	22.48014901	177.0169692	0.001076852
<b>5.8</b>	7.9579	21.98403045	157.9076045	0.001780266
<b>5.9</b>	8.7559	21.15398414	130.4362829	0.003702441
<b>6</b>	9.504	20.44187145	110.7100749	0.006321071

*Tabla 3.16 – Distancia máxima alcanzada 64-QAM/XGS-PON.*

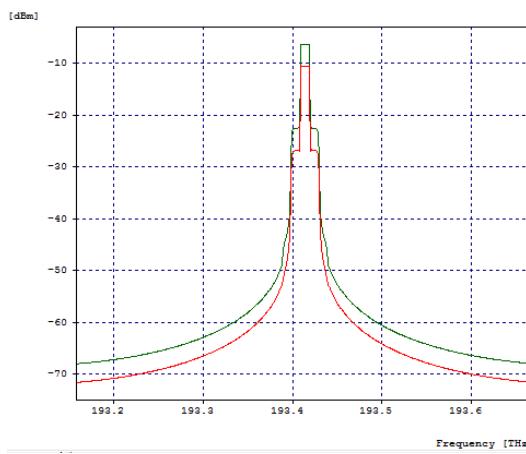
En la tabla 3.16 se observa que la distancia máxima alcanzada para un orden de modulación 64-QAM a 10 Gbps en el enlace descendente es aproximadamente 6 km, con la cual se obtuvo una BER igual a 6.3E-3 y un factor de calidad de 20.4418 dB. Por lo anterior, se toma esta distancia encontrada en el mínimo desempeño para las evaluaciones de potencia del sistema OFDM-RoF, así como también, las otras métricas de estudio planteadas. La figura 3.32 ilustra el espectro de radio

frecuencia para la señal OFDM-RoF en el transmisor (color verde) y en el receptor (color azul), utilizando un orden de modulación 64-QAM.



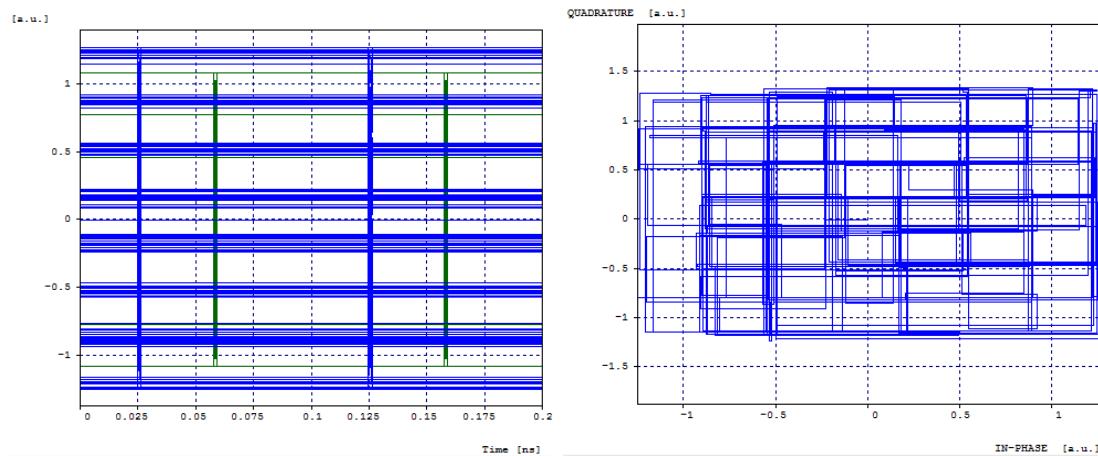
*Figura 3.32 – Señal RF-OFDM. a) Transmitida (verde). b) Recibida (azul).*

De acuerdo con las mediciones realizadas para la figura 3.32, se tiene una potencia para la señal OFDM-RoF en el transmisor de -13.7371 dB. Así mismo, en el receptor se tiene una potencia de -100.2540 dB, se dice entonces que la señal se ha atenuado alrededor de 86.5169 dB. En la figura 3.33 (a) y (b), se ilustra el comportamiento de la señal RoF, cuando es modulada ópticamente y transportada por los 6 km de longitud de fibra óptica monomodo.



*Figura 3.33 – a) Señal RoF en la OLT (verde). b) Señal RoF en la ONT (rojo).*

Las mediciones tomadas para la figura 3.33, mostraron una atenuación de la señal RoF en el domino óptico después de pasar por los 6 km de longitud de fibra óptica de aproximadamente 3.6327 dB, ya que tal señal medida en el transmisor es de -6.2130 dBm con una OSNR de 61.9417, mientras que la misma señal medida en el receptor, antes de la conversión óptica a eléctrica, es de -10.4693 dBm con una OSNR igual a 61.2886 dB. En la figura 3.34 (a) y (b), se presenta el diagrama de ojo y el diagrama de constelación para el orden de modulación 64-QAM.



*Figura 3.34 – a) Diagrama de ojo señal “I” 64-QAM en el receptor. b) Diagrama de constelación señal 64-QAM en el receptor.*

Los resultados de la tabla 3.16, demostraron que se tiene una BER igual a 6.3E-3, con un factor de calidad de 20.44 dB, con lo cual es posible una recuperación aceptable de la señal transmitida dentro del modelo de red convergente OFDM-RoF/XGS-PON, utilizando un orden de modulación 64-QAM, a 6 km de longitud de fibra óptica. La tabla 3.17 ilustra un resumen de las mediciones obtenidas en esta sección.

PARÁMETRO	Valor Tx OLT	Valor Rx ONT.
Potencia señal RF-OFDM eléctrica [dB]	-13.7371	-100.2540
Potencia señal RoF óptica [dBm]	-6.2130	-10.4693
OSNR [dB]	61.9417	61.2886
BER	1E-40	6.3E-3
Factor Q [dB]	40	20.441
EVM [%]	ideal	9.504
Apertura de ojo [a.u.]	0.308	0.2332
Jitter [ns]	0	0.0327

*Tabla 3.17 – Resultados modelo de red OFDM-RoF/XGS-PON 64-QAM.*

Finalmente, es necesario afirmar que cuando se realizó la migración de XG-PON a XGS-PON la distancia máxima alcanzada para el modelo de red convergente OFDM-RoF/XGS-PON se disminuye de 20 km iniciales para 2.5 Gbps, a 6 km para 10 Gbps, con el fin de obtener una BER en el mínimo desempeño sobre 10E-3. Por lo anterior, se dice entonces que se puede implementar tal modelo de red convergente en el enlace descendente a 10 Gbps, para prestar servicios de última milla con un gran ancho de banda para los usuarios. La figura 3.34 presenta la gráfica comparativa entre la SNR y la distancia para los distintos niveles de modulación evaluados.

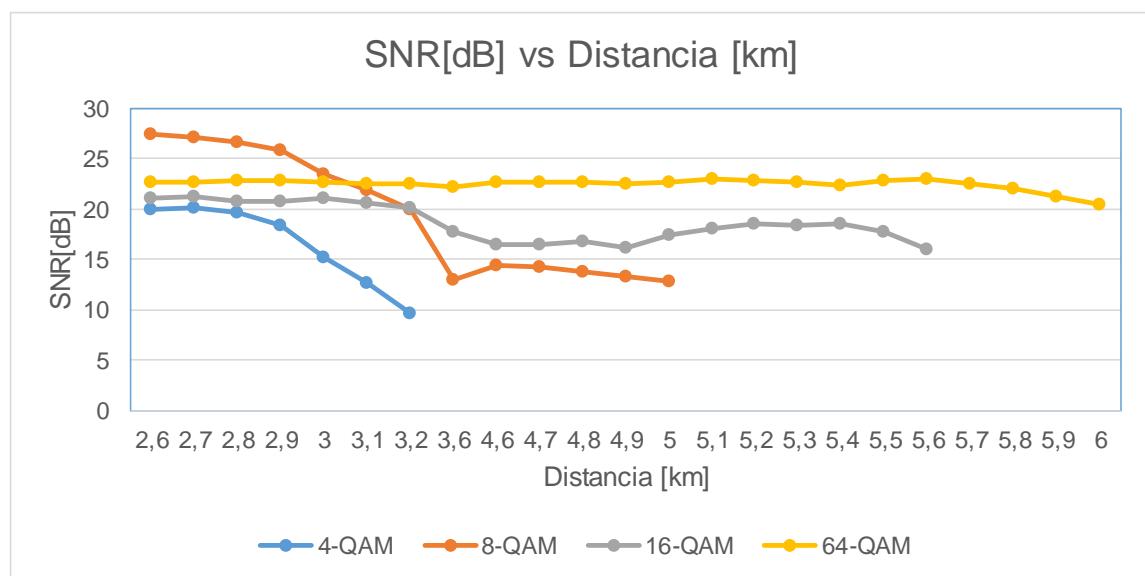


Figura 3.35 – SNR [dB] vs Distancia [km] para Modulación M-QAM a 10 Gbps.

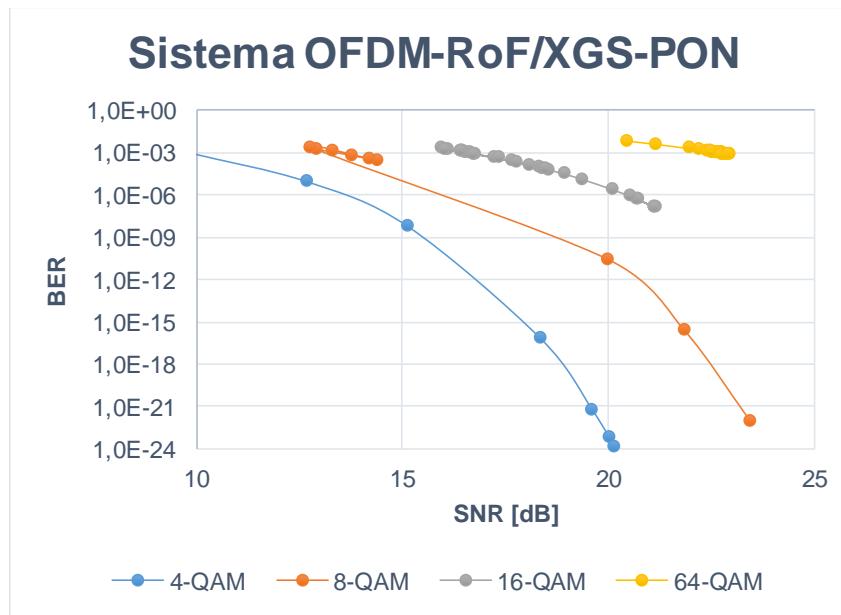


Figura 3.36 – BER vs SNR para M-QAM en el sistema OFDM-RoF/XGS-PON.

En relación a lo observado en las gráficas de las figuras 3.35 y 3.36, se nota claramente la reducción de la distancia del enlace de fibra óptica con el aumento de la velocidad de transmisión de datos, también, un incremento en el orden de modulación M-QAM, para la infraestructura de red OFDM-RoF/XGS-PON, es posible representar mayor cantidad de bits por símbolo y alcanzando una mayor distancia sin que se pierda la información en el receptor, sin embargo, a medida que aumenta la proximidad de los símbolos dentro de la constelación, es susceptible a una mayor BER debido a los fenómenos de ruido y distorsión, lo cual requiere un nivel más alto de potencia transmitida de la señal.

*Nota del autor:*

*El efecto de la técnica de modulación M-QAM para una infraestructura de red convergente OFDM-RoF/XG-PON a OFDM-RoF/XGS-PON, fue analizado, mediante métricas de estudio, escenarios de simulación, y metodologías de simulación. Con los resultados obtenidos los autores declaran que, la consecuencia de implementar la técnica de modulación M-QAM para el sistema OFDM-RoF, tanto para una velocidad en el enlace descendente de 2.5 Gbps y 10 Gbps, es la posibilidad de representar mayor cantidad de bit por símbolo a medida que incrementa el orden de modulación, sin embargo, se requiere una potencia de transmisión mayor debido a que la cercanía de los símbolos dentro de la constelación hace susceptible errores en la transmisión debido a ruido e interferencia. Por otra parte, el esquema de modulación multiportadora M-QAM se puede implementar en redes convergentes OFDM-RoF junto con redes de acceso óptico NG-PON1, ya que se utiliza eficientemente el ancho de banda disponible, a medida que se utilizan las ventajas tanto de la tecnología de radiocomunicación, como de la fibra óptica. También es claro que, una solución NG-PON1 provee escalabilidad siendo inherentemente transparente a la velocidad de bit del canal, por lo que en una migración de OFDM-RoF/ XG-PON a OFDM-RoF/XGS-PON, no existen unas pérdidas significativas en el enlace óptico, sin embargo, un aumento en la velocidad de datos, produce una degradación de la señal eléctrica y errores de detección en el receptor con el aumento de la distancia, debido a los efectos lineales y no lineales presentes la fibra óptica.*

## CAPÍTULO 4

# CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el presente trabajo de grado, se realizó el análisis del efecto de la técnica de modulación M-QAM sobre una infraestructura de red convergente OFDM-RoF/XG-PON a OFDM-RoF/XGS-PON; donde se dio cumplimiento a cada uno de los objetivos planteados en la investigación. En este capítulo, se presentan conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros relacionados con el desarrollo del presente trabajo de grado, con respecto a los aspectos más importantes que aportaron en la realización de los objetivos propuestos. Cabe resaltar que, el presente trabajo de grado permitió generar los artículos denominados: “*Effect of M-QAM modulation technique for a converged RoF network infrastructure*”, el cual fue presentado en la Revista Científica Ingeniería y desarrollo de la Universidad del Norte; así mismo, el artículo “*Effect of M-QAM modulation technique for a converged OFDM-RoF/XGS-PON network infrastructure*”, presentado para la conferencia internacional en comunicaciones realizada por el IEEE LATINCOM 2020.

### 4.1. CONCLUSIONES

- El presente trabajo de grado es una referencia para futuras investigaciones y desarrollos del modelo de red convergente OFDM-RoF en las comunicaciones inalámbricas y de banda ancha concluyendo que, el modelo de red convergente OFDM-RoF se puede implementar sobre redes de telecomunicaciones, para obtener beneficios, como: incrementar el ancho de banda, baja atenuación debido al enlace de fibra óptica, y una BER baja utilizando la técnica de modulación M-QAM; siendo claro que, las redes PON combinan la alta capacidad dada por la fibra óptica con el bajo costo de instalación y mantenimiento de una infraestructura pasiva.
- La tecnología RoF se puede utilizar en el acceso híbrido de última milla con el objetivo de unificar las ventajas de ambas tecnologías, para ofrecer un servicio de alto ancho de banda a los usuarios finales, utilizando elementos pasivos en la red, esquemas de modulación y multiplexación avanzados como M-QAM y OFDM, así como altas velocidades de transmisión de datos y la utilización de fibra óptica
- El sistema OFDM-RoF posee una mejor eficiencia en comparación con los estándares de comunicación existentes.
- Las ventajas de la fibra óptica se observan en la baja atenuación que tiene por distancia, así como la eficiencia en el ancho de banda en comparación al cobre y protección frente a ruido e interferencias.

- El esquema de modulación multiportadora se puede combinar con la tecnología RoF para implementarse en redes de acceso óptico XG-PON. Ya que esto produce un sistema de comunicación que utiliza eficientemente el ancho de banda.
- En este documento se presenta un análisis exhaustivo de la técnica de modulación M-QAM, a nivel de simulación, para una infraestructura de red convergente OFDM-RoF en el escenario de XG-PON y XGS-PON, para el caso de una posible migración. Por lo anterior, se espera que el presente trabajo de grado sea referencia de motivación para nuevas investigaciones sobre el tema en cuestión.
- La utilización de la técnica de modulación y multiplexación OFDM tiene la capacidad de proveer anchos de banda dinámicos, para múltiples servicios y con una alta eficiencia espectral, así como también se puede implementar con un sistema de telecomunicaciones basado en fibra óptica para cumplir con los requerimientos de una red NGN.
- La infraestructura de red OFDM-RoF ayuda a reducir el costo de implementación de la red, al utilizar dispositivos electrónicos rentables, en lugar de utilizar dispositivos ópticos.
- Los sistemas de radiofrecuencia presentan inherentemente características de pérdidas y atenuaciones por propagación que se hacen más notorios a frecuencias altas y limitan la distancia de cobertura, lo que conduce a arquitecturas de red que presenten tamaños de celdas más pequeñas; sin embargo, integrando estos sistemas con una red de distribución de fibra óptica, se consigue la entrega eficiente de las señales inalámbricas de alta velocidad de datos a un gran número de puntos de acceso y se optimiza la cobertura de radio.
- Un aumento en la velocidad de transmisión de datos genera un ruido de fase mayor dentro de los puntos dentro de la constelación M-QAM, causado por los efectos de la no linealidad en la fibra óptica, lo cual introduce interferencia entre portadoras.
- Cuando la velocidad de transmisión de datos incrementa, el ruido de amplitud y fase para el espectro de la señal OFDM recibida también se incrementa, lo que causa una distancia máxima alcanzada mucho menor en una posible migración de XG-PON a XGS-PON.
- Los resultados de la simulación muestran que el sistema 16-QAM-OFDM, presenta el mejor desempeño promedio a nivel general, así como también, reduce la complejidad del sistema.

OFDM-RoF		XG-PON	XGS-PON
<b>4-QAM</b>	Distancia máxima [km]	13	3.2
	SNR mínima [dB]	11.12	9.7
	BER máxima aceptable	1.6E-4	1.1E-3
	Potencia transmisión [dB]	-13.6267	-18.1961
	Potencia eléctrica recibida [dB]	-92.3591	-63.3462
	Potencia óptica recibida [dBm]	-11.6576	-9.8339
	OSNR recibida[dB]	61.14	61.1341
<b>8-QAM</b>	Distancia máxima [km]	20	5
	SNR mínima [dB]	13.1	12.75
	BER máxima aceptable	1.3E-3	1.9E-3
	Potencia transmisión [dB]	-12.3481	-16.5547
	Potencia eléctrica recibida [dB]	-104.1736	-102.3441
	Potencia óptica recibida [dBm]	-13.0923	-10.1427
	OSNR recibida [dB]	60.1617	60.6494
<b>16-QAM</b>	Distancia máxima [km]	20	5.6
	SNR mínima [dB]	17.44	16.047
	BER máxima aceptable	3.2E-4	1.7E-3
	Potencia transmisión [dB]	-11.0817	-15.6287
	Potencia eléctrica recibida [dB]	-103.3403	-102.2173
	Potencia óptica recibida [dBm]	-13.0922	-10.3202
	OSNR recibida [dB]	60.7174	60.7606
<b>64-QAM</b>	Distancia máxima [km]	20	6
	SNR mínima [dB]	22.92	20.441
	BER máxima aceptable	6.5E-4	6.3E-3
	Potencia transmisión [dB]	-9.7265	-13.7371
	Potencia eléctrica recibida [dB]	-101.6959	-100.2540
	Potencia óptica recibida [dBm]	-13.0884	-10.4693
	OSNR recibida [dB]	61.1963	61.2886

*Tabla 4.1 – Análisis comparativo técnica de modulación M-QAM para OFDM-RoF/XG-PON a OFDM-RoF/XGS-PON.*

## 4.2. RECOMENDACIONES

Con el desarrollo del presente trabajo de grado, se identificaron las siguientes recomendaciones a tener en cuenta para el proceso de investigación relacionada con el título de la presente tesis, como sigue:

- Con la combinación del esquema de modulación multiportadora OFDM junto con la tecnología RoF, es posible desarrollar un fuerte estándar de comunicación, que utiliza de manera eficiente las ventajas de la fibra óptica.
- La técnica de multiplexación ortogonal OFDM, utilizando la técnica por detección coherente en lugar de la técnica por detección directa, puede ser

implementada junto con la tecnología RoF, para alcanzar muy grandes distancias en el enlace óptico con un alto desempeño del sistema.

- El aumento de las demandas en las redes de acceso y troncales requiere de esquemas de modulación como M-QAM, aunque se requiera aumentar la potencia para lograr una BER aceptable.
- El desempeño del modelo de red convergente OFDM-RoF implementado en este trabajo de grado, se puede mejorar con la combinación de técnicas como WDM y SCM para obtener mayores velocidades de datos transportando distintos canales de radiofrecuencia a través de un enlace óptico utilizando el esquema de modulación M-QAM.
- Se pueden considerar otras herramientas de simulación, por ejemplo OptiSystem, el cual ofrece un desempeño similar a OptSim, es utilizado en la mayoría de investigaciones sobre redes convergentes, y no requiere necesariamente de licencia para poder emplearse.
- Establecer una metodología de investigación y simulación, para garantizar una fácil obtención de resultados y que sean acordes al contexto de desarrollo del trabajo. Se debe tener en cuenta que la herramienta OptSim establece sus propias técnicas y estrategias de simulación.
- Tener como referencia la guía de OptSim y demás documentos que contienen información sobre los componentes y funcionalidades de esta herramienta, además de la explicación de los ejemplos que vienen por defecto.

### **4.3. TRABAJOS FUTUROS**

Se identificaron nuevas propuestas de investigación, como sigue:

- Análisis de desempeño a nivel de simulación de la técnica WDM para una infraestructura de red híbrida RoF, implementando formatos OOFDM.
- Evaluación del desempeño a nivel físico de la técnica CO-OFDM para una infraestructura de red híbrida RoF utilizando diferentes longitudes de fibra óptica.
- Evaluación del desempeño a nivel físico de la técnica CO-OFDM para una infraestructura de red híbrida RoF utilizando diferentes amplificadores ópticos.
- Diseño a nivel de simulación de una infraestructura de red convergente OFDM-RoF en la frecuencia de las ondas milimétricas.
- Análisis de costos para la implementación de una red híbrida RoF que ofrezca servicios móviles de banda ancha en la ciudad de Popayán.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. F. Escallón-Portilla and V. H. Ruiz-Guachetá, "Evaluación del desempeño a nivel físico de un sistema FTTH-GPON para servicios Quad Play al integrar un módulo RoF," Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, 2018.
- [2] A. Dhingra, S. Kumar, P. Arora, D. Sharma, and S. Dahiya, "A Comprehensive Review of QAM-OFDM Optical Networks," *Int. J. Comput. Sci. Eng.*, vol. 6, no. 11, pp. 811–817, 2018.
- [3] I. Tafur Monroy *et al.*, "Convergencia de sistemas de comunicación ópticos e inalámbricos," *Óptica Pura y Apl.*, vol. 2, no. 42, pp. 83–90, 2019.
- [4] F. Mohammed Ali, E. Abd-Almalik, and M. Gamil-Tarbul, "Performance Analysis of Radio over Optical Fiber System with OFDM Using Multiplexing Techniques," *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 13, no. 12, pp. 10831–10844, 2018.
- [5] H. S. Abbas and M. A. Gregory, "The next generation of passive optical networks: A review," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 67, no. 67, pp. 53–74, May 2016.
- [6] D. Spears, B. Ford, P. Shumate, and R. Menendez, "FSAN initiative propels broadband access worldwide," *Lightwave*, California, pp. 60–89, Sep-1999.
- [7] A. M. Ragheb and H. Fathallah, "Candidate modulation schemes for next generation- passive optical networks (NG-PONs)," in *High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET)*, 2012, pp. 226–231.
- [8] F. C. Europe, "FTTH Hangbook." FTTH Council Europe, 2018.
- [9] T. S. S. ITU, "Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics." Recommendation ITU-T G.984.1, Ginebra, 2008.
- [10] J. A. Altabas, S. Sarmiento, and J. A. Lazaro, "Passive Optical Networks, Introducion." Universitat Politècnica de Catalunya, Spain, 2018.
- [11] J. C. Ballesta P. and J. Boltimore, "Passive Optical Network (PON): Características y ventajas.,," *Rev. Antioqueña las Ciencias Comput.*, vol. 7, no. 2, pp. 4–9, 2017.
- [12] Vinita, "A Comprehensive Review of Recent Advancement in Optical Communication Networks," *Int. J. Comput. Sci. Eng.*, vol. 6, no. 9, pp. 617–626, 2018.
- [13] ITU-T Q2 / Study Group 15, "ITU-T PON standards - progress and recent activities." 2018.
- [14] T. S. S. ITU, "Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): Transmission convergence layer specification." Recommendation ITU-T G.984.3, Ginebra, 2014.
- [15] T. S. S. ITU, "Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): ONT management and control interface specification." Recommendation ITU-T G.984.4, Ginebra, 2008.
- [16] T. S. S. ITU, "Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Enhancement band." Recommendation ITU-T G.984.5, Ginebra, 2014.
- [17] T. S. S. ITU, "Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Reach extension." Recommendation ITU-T G.984.6, Ginebra, 2008.
- [18] T. S. S. ITU, "Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Long reach."

- Recommendation ITU-T G.984.7, Ginebra, 2010.
- [19] S. A. Ramírez-Zapata, "Diseño de una red FTTH para el acceso de banda ancha en el condominio de Galilea - Castilla, utilizando tecnología GPON," Universidad Nacional de Piura, 2019.
- [20] S. N. T. UIT, "Visión general de las redes de próxima generación." Recomendación UIT-T Y.2001, Ginebra, 2004.
- [21] T. S. S. ITU, "10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms." Recommendation ITU-T G.987, Ginebra, 2012.
- [22] T. S. S. ITU, "10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements." Recommendation ITU-T G.987.1, Ginebra, 2016.
- [23] T. S. S. ITU, "10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification." Recommendation ITU-T G.987.2, Ginebra, 2017.
- [24] T. S. S. ITU, "10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Transmission convergence (TC) layer specification." Recommendation ITU-T G.987.3, Ginebra, 2014.
- [25] T. S. S. ITU, "10 Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Reach extension." Recommendation ITU-T G.987.4, Ginebra, 2012.
- [26] T. S. S. ITU, "10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON)." Recommendation ITU-T G.9807.1, Ginebra, 2016.
- [27] T. S. S. ITU, "10 Gigabit-capable passive optical networks (XG(S)-PON): Reach extension." Recommendation ITU-T G.9807.2, Ginebra, 2017.
- [28] G. A. Gomez-Agredo, "Mejora de la eficiencia espectral en redes DWDM a 40 Gbps a través de los formatos de modulación avanzados DPSK y DQPSK," Universidad del Cauca, 2019.
- [29] M. V. Maisincho-Anchapanta, "Diseño para la implementación de la red FTTH para el servicio de internet provisto por la empresa IPLANET S.A. en Yaruquí y Tababela mediante la evaluación de estándares PON," Universidad Tecnológica de Israel, 2019.
- [30] T. S. S. ITU, "40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements." Recommendation ITU-T G.989.1, Ginebra, 2013.
- [31] T. S. S. ITU, "40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification." Recommendation ITU-T G.989.2, Ginebra, 2019.
- [32] T. S. S. ITU, "40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Transmission convergence layer specification." Recommendation ITU-T G.989.3, Ginebra, 2019.
- [33] Comisión de Regulación de Telecomunicaciones de Colombia, "Regulación de redes en convergencia (NGN)," *Doc. Estud.*, p. 59, 2008.
- [34] T. J. Barnett, A. Sumits, S. Jain, and U. Andra, "Cisco Visual Networking Index (VNI) Update Global Mobile Data Traffic Forecast," *Vni*, pp. 2015–2020, 2015.
- [35] ZTE Communications, "Optical Wireless Communications," *Editorial Office of ZTE Communications*, Nov-2016.
- [36] A. P. Carrillo, "Diseño de un sistema de radio sobre fibra óptica para ondas

- milimétricas en redes móviles 5G Diseño de un sistema de radio sobre fibra óptica para ondas milimétricas en redes móviles 5G,” Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2018.
- [37] J. James *et al.*, “Hacia la próxima generación de sistemas de Radio sobre Fibra de banda ancha: retos tecnológicos en la banda de las ondas milimétricas,” *Ing. y Desarollo*, vol. 29, no. 2, pp. 242–265, 2011.
- [38] R. C. Román Torres, “Hybrid Fiber Radio Networks: New Concepts and Technologies,” Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
- [39] D. Novak *et al.*, “Radio-over-fiber technologies for emerging wireless systems,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 52, no. 1, 2016.
- [40] A. F. Escallón-Portilla, V. H. Ruíz-Guachetá, and J. G. López-Perafán, “Evaluation of the Physical Performance of an FTTH-GPON System for Quad Play Services After the Incorporation of an RoF Module,” *TecnoLógicas*, vol. 23, no. 47, pp. 23–61, 2020.
- [41] R. Waterhouse *et al.*, “RF Over Fiber Distribution Schemes for 60 GHz Wireless Personal Area Networks (WPANs),” in *Asia-Pacific Microw*, 2011.
- [42] A. Nirmalathas, P. A. Gamage, C. Lim, D. Novak, and R. B. Waterhouse, “Digitized radio-over-fiber technologies for converged optical wireless access network,” *J. Light. Technol.*, vol. 28, no. 16, pp. 2366–2375, 2010.
- [43] M. Ortiz, “Estudio y Caracterización de un Modulador Electroóptico Mach-Zehnder,” Esc. Técnica Super. Ing. Telecomunicación, 2012.
- [44] A. Lerín, “Modulación directa de diodos láser de alta velocidad para sistemas de transmisión coherente,” Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.
- [45] A. S. Al-Shantti, “Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing Direct Detection for Improving Capacity of Radio over Fiber Transmission System,” The Islamic University of Gaza, 2012.
- [46] S. Sari, “Modelling the transport of complex modulation in Radio-over-Fibre Networks,” University College London, London, England, 2007.
- [47] O. O. Omomukuyo, “Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Optical Access Networks,” University College London, 2013.
- [48] J. J. G. Torres, A. M. C. Soto, and N. G. González, “A novel dispersion monitoring technique in W-band radio-over-fiber signals using clustering on asynchronous histograms,” *Ing. e Investig.*, vol. 34, no. 3, pp. 76–80, Sep. 2014.
- [49] J. Rodríguez Luque and S. Clavijo Suero, “Modulación de señales digitales,” Universidad de Sevilla, 1995.
- [50] R. Tamayo, “Interconexión inalámbrica de sistemas de comunicaciones móviles para la transmisión de servicios multimedia,” Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, 1997.
- [51] A. García-Marqués, “Patrones Eficientes de Pilotos en Sistemas OFDM para Canales Inalámbricos Selectivos en Tiempo y Frecuencia.” Universidad Rey Juan Carlos, España, 2005.
- [52] R. H. Sharma and K. R. Bhatt, “A Review on Implementation of QAM on FPGA,” *Int. J. Innov. Res. Comput. Commun. Eng.*, vol. 3, no. 3, pp. 1684–1688, 2015.

- [53] R. D. Guayaquil Loor, "Diseño de una GUI en MATLAB para evaluar técnicas de modulación de amplitud en cuadratura (QAM)," Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2018.
- [54] J. García, "Aportaciones a nuevos estándares de televisión digital," Universidad de Sevilla, 2011.
- [55] G. Gomez and G. López, "Formatos Avanzados de Modulación y su Implementación en las Tecnologías del Futuro." Universidad del Cauca, Popayán.
- [56] R. Karthikeyan and S. Prakasam, "Performance of Bit Error Rate and Q-Factor for OFDM-RoF System using QAM Modulation," *Curr. Trends Technol. Sci.*, vol. VII, no. I, pp. 827–835.
- [57] D. Pérez Calderón, C. Oria, J. García, P. López, V. Baena, and I. Lacadena, "Rotated Constellations for DVB-T2." Universidad de Sevilla, Sevilla, 2008.
- [58] M. C. D. Maddocks, "An introduction to Digital Modulation and OFDM Techniques." The British Broadcasting Corporation, England, 1993.
- [59] J. Garrido Holgado and J. Fabrega Sánchez, "Diseño y simulación de sistemas OFDM / A ópticos para redes de nueva generación," Universitat Oberta de Catalunya, 2010.
- [60] L. N. Binh, *Advanced Digital Optical communications*, Second edi. Alemania: CRC Press, 2015.
- [61] X. López Quiroz and C. Mora Martínez, "Análisis de técnicas de modulación adaptiva en redes inalámbricas de banda ancha," Universidad Nacional Autónoma de México, 2006.
- [62] F. Khair, H. P. Fakhriy, I. W. Mustika, B. Setiyanto, and S. M. Idrus, "Modeling and simulation of OFDM scheme for radio over fiber (RoF)," in *ICITACEE 2015 - 2nd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering: Green Technology Strengthening in Information Technology, Electrical and Computer Engineering Implementation, Proceedings*, 2016.
- [63] Laia Nadal Reixats, "Performance analysis of optical OFDM transmission systems using PAPR mitigation techniques and alternative transforms.," Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.
- [64] W. Shieh and C. Athaudage, "Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing." *Electron. Lett.*, 2006.
- [65] H. Ali, "Modeling and Simulation of High Speed Optical Fiber Communication System with OFDM," *ASRJETS*, vol. 18, 2017.
- [66] MathWorks, "Matlab y Simulink." [Online]. Available: [https://la.mathworks.com/products.html?s\\_tid=gn\\_ps](https://la.mathworks.com/products.html?s_tid=gn_ps). [Accessed: 11-Feb-2020].
- [67] Optiwave Photonic Software, "OptiSystem." [Online]. Available: <https://optiwave.com/optisystem-overview/>. [Accessed: 11-Feb-2020].
- [68] RSoft Design Group and Inc, "OptSim User Guide." 2010.
- [69] R. S. Pressman, *Ingeniería del software un enfoque práctico*, Séptima ed. New York: McGraw-Hill Interamericana Editores, 2010.
- [70] N. U. Quispe-Mamani, "Simulación Ingeniería Sistemas de Información."

- Argentina, 2004.
- [71] J. M. C. Muñoz, “Metodología para la Simulación de Equipos de Telecomunicaciones.” Popayán, 1995.
  - [72] B. González and B. Múgica, “La dinámica de sistemas como metodología para la elaboración de modelos de simulación.” Oviedo, 1998.
  - [73] Universitat Politécnica de Catalunya, “OPNET: Manual de usuario.” Universitat Politécnica de Catalunya, Barcelona, 2004.
  - [74] T. S. S. ITU, “Radio-over-fibre (RoF) technologies and their applications.” ITU-T G-series Recommendations – Supplement 55, Ginebra, 2015.
  - [75] N. Amagua and N. Mogro, “Analisis y simulacion de un enlace de radio sobre fibra optica (RoF) a 60 Ghz.” Quito, Ecuador, 2013.
  - [76] T. S. S. ITU, “Characteristics of a single-mode optical fibre and cable.” Recommendation ITU-T G.652, 2016.
  - [77] O. Corporation, “90-Degree Optical Hybrid.” Optoplex Corporation, Fremont, U.S.A.

# LICENCIA



**Atribución-NoComercial-SinDerivadas  
4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)**

**Bajo los siguientes términos:**



**Atribución** — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales.



**SinDerivadas** — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, no podrá distribuir el material modificado.

Esta obra está publicada bajo una Licencia

[Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas  
4.0 Internacional.](#)

Universidad del Cauca